

COMPORTAMIENTO AERODINAMICO DE BARRERAS CORTAVIENTOS

LABORATORIO DE AERODINAMICA Y MECANICA DE FLUIDOS

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTACION Y METODOS DE MEDIDA

1. INTRODUCCIÓN.

El objeto de este capítulo es describir someramente las instalaciones, modelos e instrumentación utilizados en los ensayos, y discutir algunos problemas relacionados con los métodos de medida, con el fin de valorar debidamente los resultados obtenidos.

Los ensayos se han realizado en un túnel de baja turbulencia, provisto de una cámara de sección rectangular cuyas dimensiones son: anchura, 70 mm; altura, 1000 mm, y longitud, 1650 mm. Con objeto de instalar un sistema para desplazar la sonda, se ha colocado un falso suelo provisto de un borde de ataque redondeado, lo que ha reducido la altura de la cámara de ensayos a 680 mm.

El túnel está provisto de dos motores (uno a la entrada y otro a la salida) de 1.2 CV de potencia, cada uno de los cuales mueve una hélice de 8 palas. Las revoluciones de cada motor se varían, a distancia, con sendos reóstatos de regulación de la excitación. De esta forma, es posible regular la velocidad en la cámara de ensayos entre 0 y 20 metros por segundo.

El nivel de turbulencia está gobernado por dos mallas metálicas de precisión, situadas delante de una contracción de 10 : 1. Las mallas tienen 20 hilos por cm, y el diámetro de cada hilo es 0.2 mm. El nivel de turbulencia de la corriente no perturbada vale, a la entrada de la cámara:

$$\sqrt{u'^2}/U = 0.002.$$

Para medir la velocidad, tanto por ciento de turbulencia, y esfuerzos aparentes de Reynolds, se ha utilizado un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante DISA 55 D 00 (*). Las sondas empleadas han sido: DISA 55 A 25 (para la velocidad y tanto por ciento de turbulencia) y DISA 55 A 29 (para la inclinación de la corriente y esfuerzos de Reynolds).

Para desplazar la sonda a través de cada sección de la estela, se utiliza un mecanismo de biela-manivela, colocado bajo el falso suelo del túnel, y arrastrado por un motor de 1.5 W. Cada vez que la sonda pasa por delante de una posición de medida, marcada en la pared del túnel, se desconecta el motor de arrastre con el fin de que la sonda permanezca inmóvil durante la realización de las lecturas. Las posiciones de medida distan entre sí 5 mm, y el ensayo, que se inicia cuando la sonda está en las proximidades del suelo, se termina cuando cinco valores consecutivos de la velocidad media son iguales, lo que se considera indicio de que se ha alcanzado la corriente exterior.

La figura 3-1 muestra la instalación y las sondas utilizadas.

Como ayuda para interpretar los resultados, se ha visualizado la corriente inyectando humo a la entrada de la cámara de ensayos mediante tubos paralelos de 8 mm de diámetro, cuyos ejes distan entre sí 15 mm. En ciertos casos particulares se ha utilizado un túnel de mayores dimensiones (cámara de ensayos de: anchura, 1200 mm; altura, 800 mm, y longitud, 1200 mm) para visualizar la estela mediante una pintura fresca, formada suspendiendo negro de humo en gas-oil, con la que se recubre una de las paredes del túnel que limitan lateralmente el dominio fluido.

Se han ensayado 16 modelos distintos de ma-

(*) Fabricado por Disa Elektronik, A/S DK 2730, Herlev (Dinamarca).

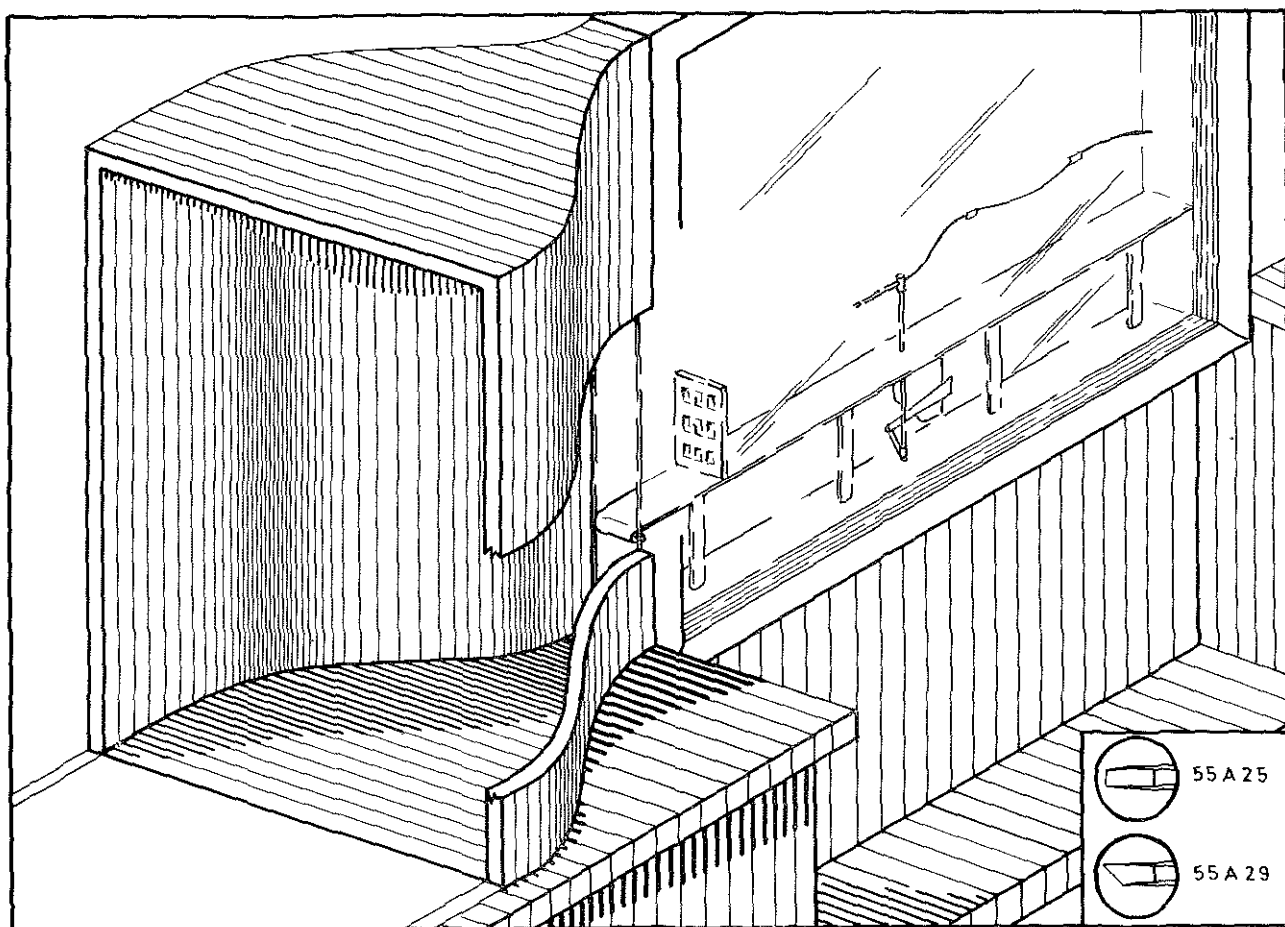


Fig. 3-1. — Esquema del túnel y de las sondas utilizadas.

dera, latón y plástico; sus dimensiones son: anchura, 66 mm y altura dependiente del modelo, pero del orden de los 100 mm. Los números de Reynolds obtenidos (tomando como longitud característica la altura de la barrera) oscilan entre 10^4 y 10^5 . Las figuras 3-2 a 3-17 muestran las dimensiones de las distintas barreras, juntamente con la clave utilizada, en lo sucesivo, para designarlas.

2. MEDIDAS DE LA VELOCIDAD MEDIA TEMPORAL Y DEL NIVEL DE TURBULENCIA.

El interés por conocer la velocidad del viento en cada punto y en cada instante, reside en que del valor de la velocidad se deducen los esfuerzos mecánicos a que está sometida la zona protegida por la barrera. El problema planteado por la existencia, en cada punto, de una fluctuación turbulenta con una escala de tiempo muy pequeña, se resuelve, en parte, considerando que el vector velocidad local es suma de un valor medio temporal y un vector de agitación. Tanto el valor medio como la media

cuadrática de la agitación se miden, con ciertas restricciones, mediante el anemómetro de hilo caliente.

La anemometría de hilo caliente se funda en la ley de King, quien comprobó que el calor cedido por un hilo sumergido en una corriente fluida a menor temperatura, es función lineal de la raíz cuadrada de la velocidad del fluido. Por tanto, de la medida de la tensión eléctrica, E , necesaria para mantener constante la temperatura del hilo, se puede deducir la velocidad del fluido U .

De acuerdo con las leyes de Joule (del calentamiento eléctrico) y King tenemos:

$$E^2 = E_0^2 + B U^{1/2}, \quad (1)$$

donde E_0 es la tensión necesaria para calentar el hilo hasta una temperatura dada, cuando el fluido está en reposo; y B es un parámetro que depende de las características del hilo y del fluido. En el caso de movimiento incomprensible de un fluido homogéneo, B es constante y se obtiene fácilmente mediante un tarado previo en una instalación auxiliar; en caso contrario, B depende de la composi-

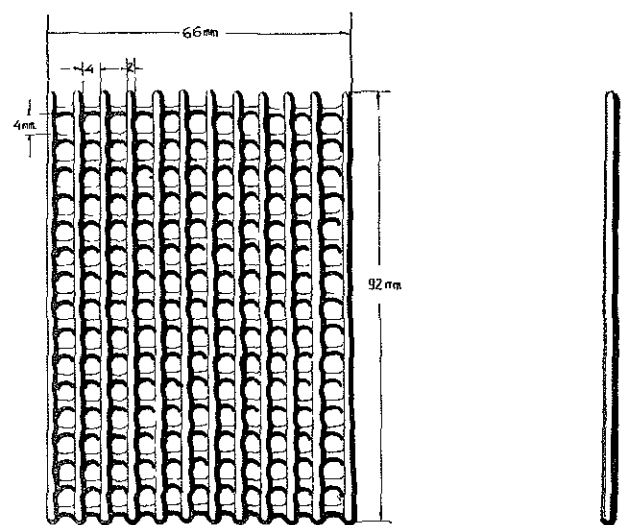


Fig. 3-2. — Modelo A₁.

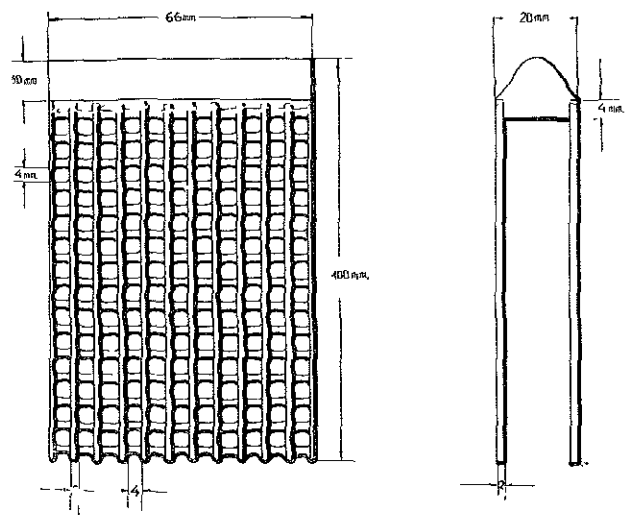


Fig. 3-5. — Modelo A₁.

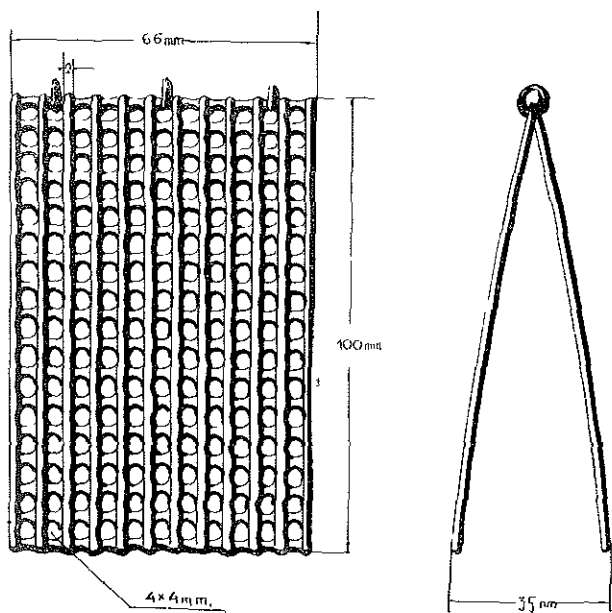


Fig. 3-3. — Modelo A₂.

Fig. 3-4. — Modelo A₃.

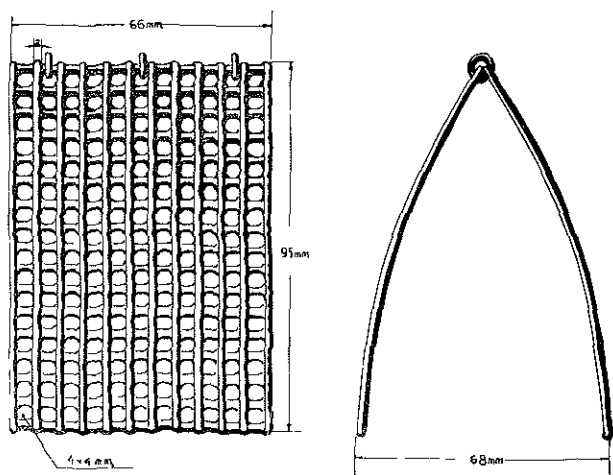
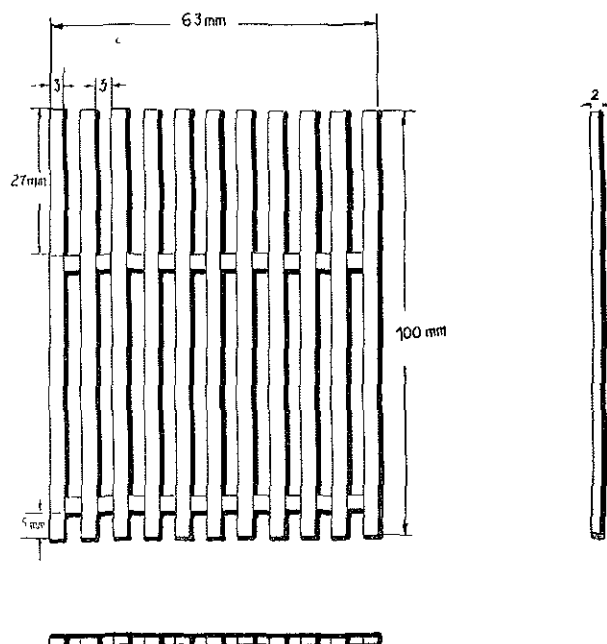


Fig. 3-6. — Modelo B.



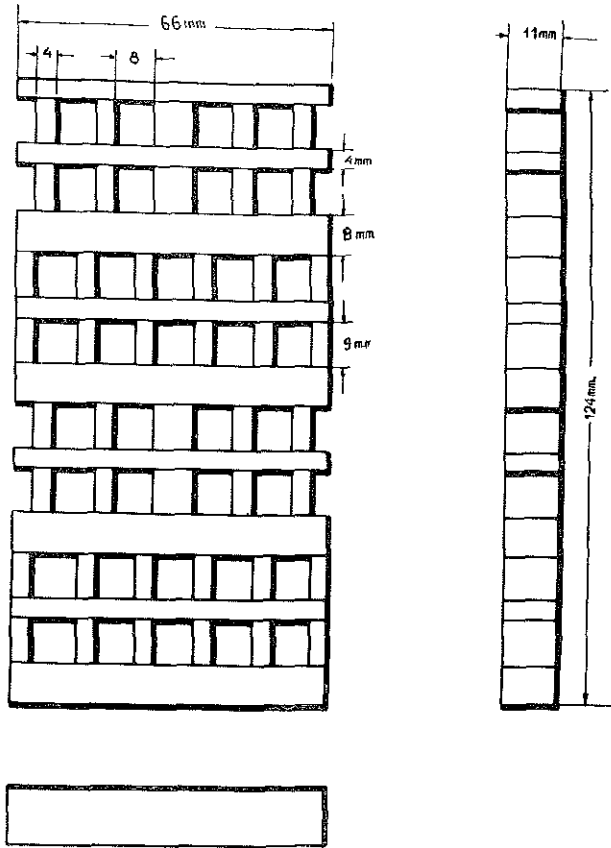


Fig 3-7 — Modelo C₁

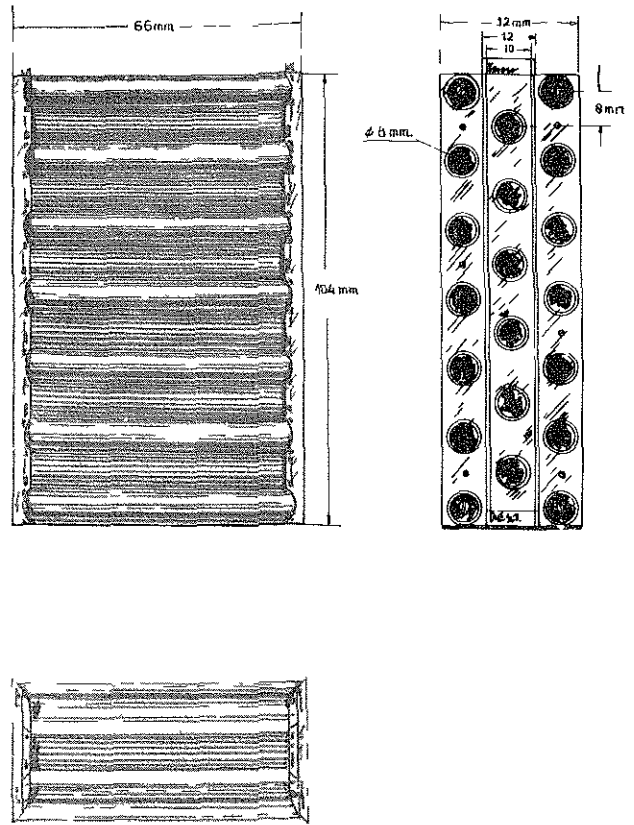
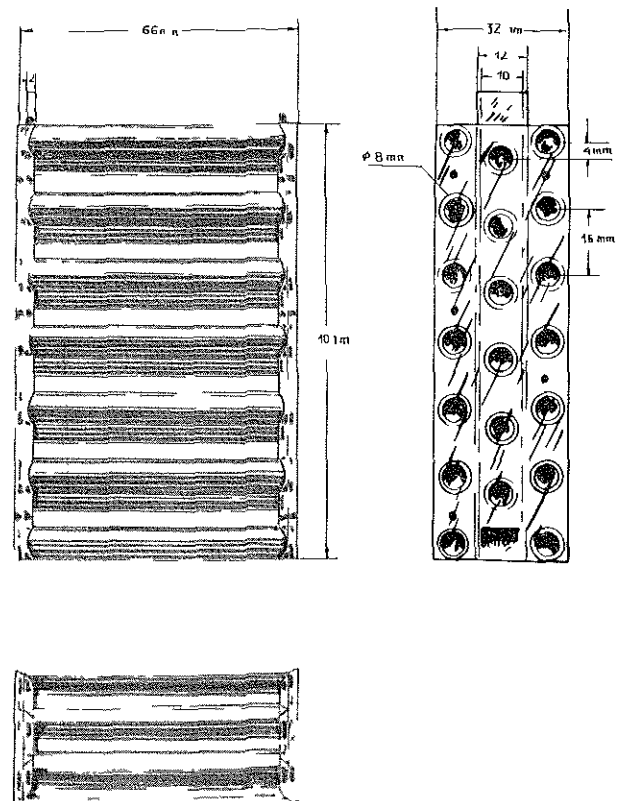
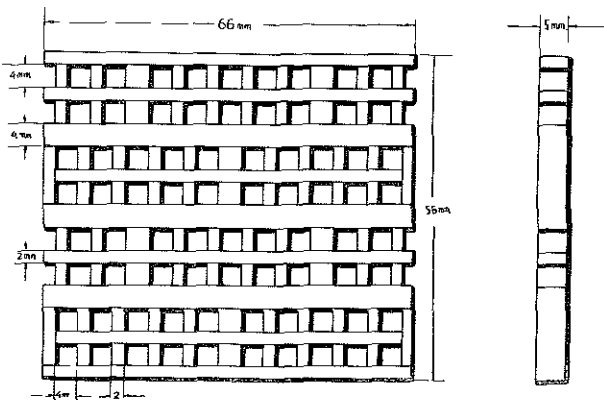


Fig 3-9 — Modelo D₁

Fig 3-10 — Modelo D₂

Fig 3-8 — Modelo C₂



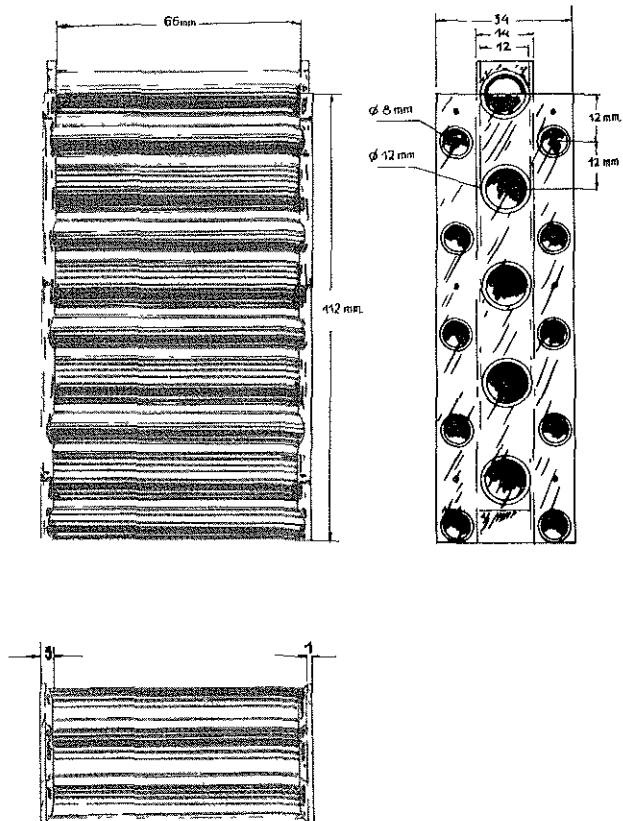


Fig. 3-11. — Modelo D₃.

Fig. 3-12. — Modelo D₄.

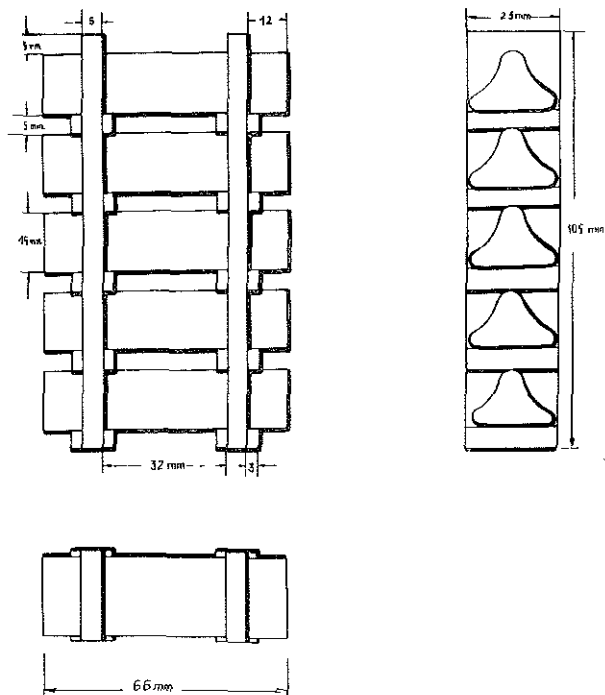
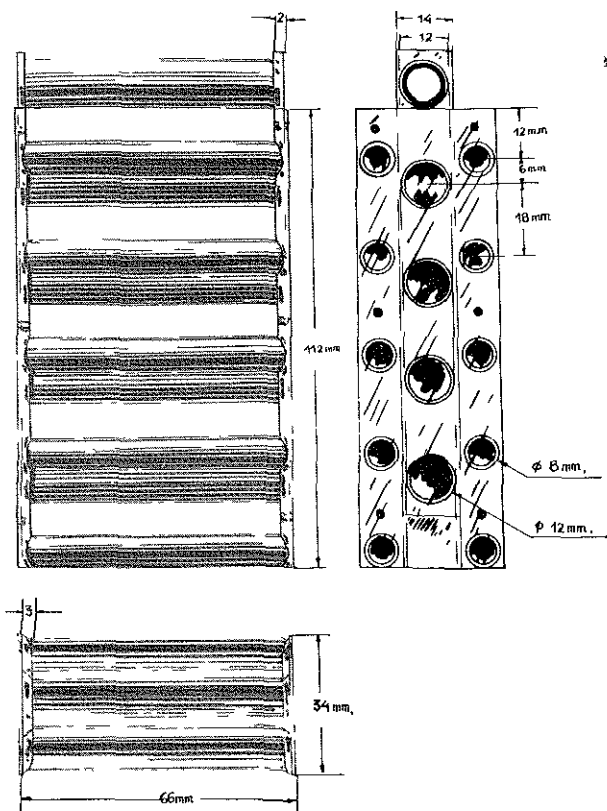


Fig. 3-13. — Modelo E.

Fig. 3-14. — Modelo F₁.

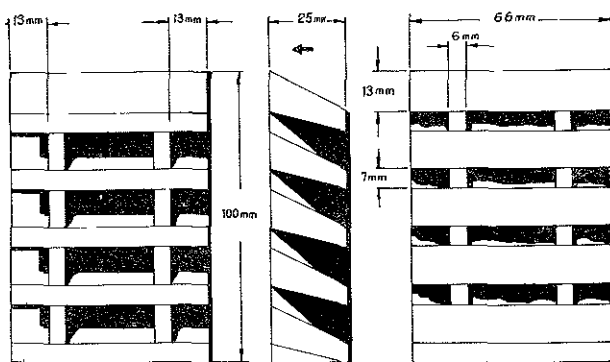
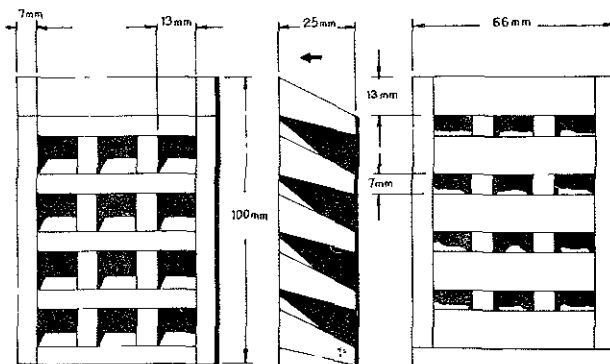
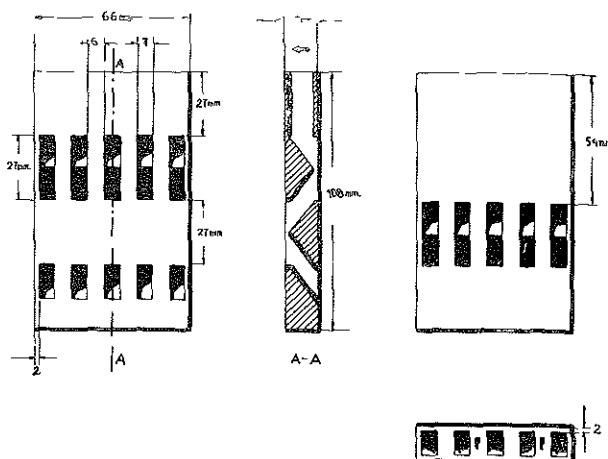
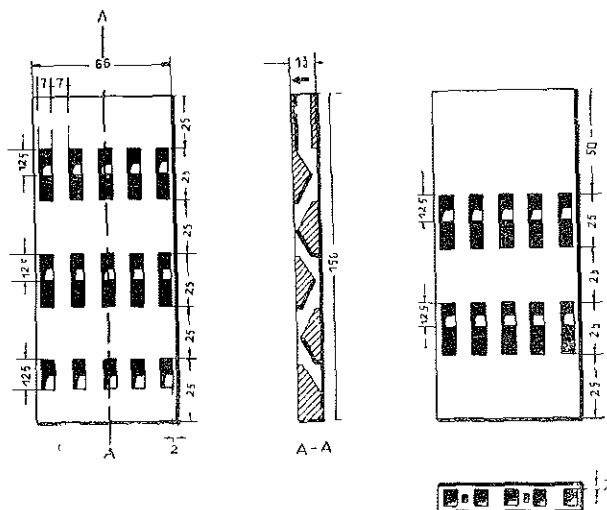


Fig. 3-15. — Modelo F₂.





ción y temperatura del gas, y el problema de medir con el anemómetro de hilo caliente se complica extraordinariamente. Afortunadamente, no es éste nuestro caso.

Las referencias [1] y [2] presentan sendas revisiones de la técnica de anemometría de hilo caliente.

Para realizar los ensayos que se describen más adelante, se ha tarado el hilo una vez a la semana. La figura 3-18 indica que las curvas de tarado obtenidas a intervalos de tiempo menores, son prácticamente idénticas.

El hilo es de tungsteno recubierto de platino, tiene un diámetro de 5 μm , una longitud de 1 mm y su temperatura es 1,8 veces la exterior. Está situado en un plano horizontal y es perpendicular a la dirección de la corriente no perturbada, por tanto, mide la componente de la velocidad, situada en un

plano paralelo a las paredes del túnel. Dicha componente es prácticamente horizontal suficientemente lejos, corriente abajo, de la barrera, pero cerca de la barrera presenta una inclinación que se mide como explicaremos en el apartado siguiente.

Para obtener la media cuadrática de la fluctuación turbulenta se supone válida la ley de King, aplicada a valores instantáneos de tensión eléctrica y velocidad del fluido:

$$(E + e')^2 = E_0^2 + B [(U + u')^2 + w'^2]^{1/4}, \quad (2)$$

donde e' es el valor instantáneo de la componente de alterna de la tensión, u' y w' son las componentes de la velocidad de fluctuación situadas en un plano perpendicular al hilo, y U la correspondiente media temporal. Cuando la inclinación de la corriente no es pequeña hay que sustituir, en (1), U por $(U^2 + W^2)^{1/2}$ y, en (2), w' por $W + w'$.

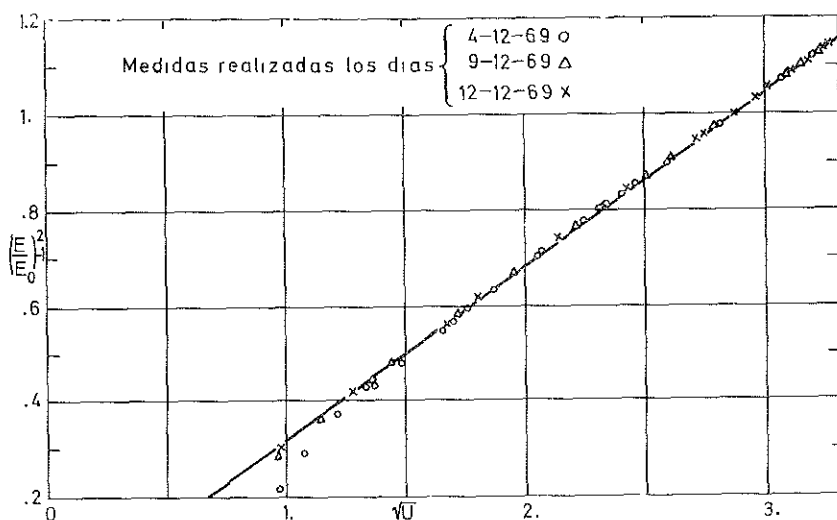


Fig. 3-18.—Puntos de tarado de una misma sonda en las fechas indicadas.

En los casos en que la velocidad de agitación sea, en todo momento, pequeña comparada con la velocidad media, es posible simplificar (2) despreciando términos de orden superior, con lo que resulta:

$$E^2 + 2Ee' = E_0^2 + B U^{1/2} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{u'}{U} \right] + O \left(\left(\frac{u'}{U} \right)^2 \right)$$

que, teniendo en cuenta (1) y tomando valores medios, se reduce a

$$\frac{4E}{E^2 - E_0^2} \sqrt{e'^2} = - \frac{\sqrt{u'^2}}{U}, \quad (3)$$

ecuación que relaciona el nivel de turbulencia con el valor eficaz de la componente de alterna de la tensión.

Como ya hemos indicado, la ecuación (3) es válida únicamente cuando $\sqrt{u'^2}/U$ es suficientemente pequeño; en caso contrario hay que considerar términos de orden superior en el desarrollo en serie del segundo miembro de (2), y aparece la componente w' de la velocidad, que es preciso medir independientemente. En general no se ha juzgado necesario utilizar dicha aproximación de orden superior.

Se acostumbra a considerar el valor de $\overline{u'^2}$ como suma de las contribuciones de todas las frecuencias, n , o números de onda, $k = 2\pi n/U$, en que se descompone el espectro de la energía cinética de la fluctuación turbulenta. Si $\varepsilon(k) dk$ es la contribución, a la energía cinética, de los números de onda comprendidos entre k y $k + dk$, tenemos:

$$\overline{u'^2} = \int_0^\infty \varepsilon(k) dk.$$

En la práctica existen ciertas limitaciones que impiden extender la integración a frecuencias excesivamente grandes y, por otra parte, parece innecesario hacerlo, ya que la energía cinética de la agitación turbulenta está concentrada principalmente en la parte del espectro correspondiente a números de onda bajos, mientras que para valores grandes de k es $\varepsilon(k) \sim k^{-5/3}$ o menor.

Dryden [3] estudió la influencia del filtrado de las frecuencias altas en el valor medido de la energía cinética turbulenta. Cuando la integración se extiende a todas las frecuencias comprendidas entre $n = 0$ y $n = U/L_x$, donde L_x es el radio longitudinal de correlación (o escala longitudinal de los torbellinos turbulentos), la relación de la energía medida a la total vale 0,9, y esta relación tiende a 1 cuando nL_x/U tiende a infinito. Para tener una idea del orden de magnitud de L_x se indica que, en el caso de un chorro turbulento [4], L_x crece en la zona turbulenta inicial del chorro como 0,1 x .

La figura 3-19 muestra la influencia del filtrado en la distribución de nivel de turbulencia en

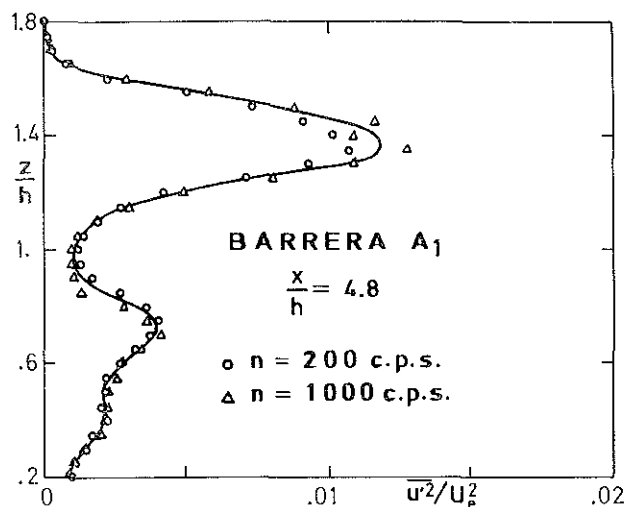


Fig. 3-19. — Influencia del filtrado de las frecuencias altas en el valor medido del nivel de turbulencia.

una sección de la estela de una barrera. Se comprueba que el error cometido no es grande, siempre que el filtro pasa-bajos del anemómetro permita el paso de, por lo menos, las frecuencias inferiores a 200 c.p.s.

3. MEDIDAS DE LOS ESFUERZOS DE REYNOLDS Y DE LA INCLINACIÓN DE LA CORRIENTE.

Desde un principio se comprobó que la instalación de una barrera producía modificaciones en el microclima y en el crecimiento de las plantas, distintos de la mera protección de los efectos mecánicos del viento.

La mayoría de los cambios que la barrera produce en el ambiente se deben a su influencia sobre el transporte convectivo y difusivo de calor y masa.

Presentar un análisis riguroso de la difusión turbulenta es sumamente difícil, pero en la mayoría de las aplicaciones técnicas es suficiente suponer que los transportes de calor y masa obedecen al mismo mecanismo que el transporte de cantidad de movimiento, y que basta asignar factores constantes apropiados al flujo de cantidad de movimiento para tener los flujos de calor y de las diferentes especies.

El flujo turbulento vertical de componente horizontal de cantidad de movimiento, o esfuerzo cortante de Reynolds, entre dos capas horizontales contiguas vale:

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u' w'}.$$

Para medir el esfuerzo de Reynolds comenzamos observando que un hilo, suficientemente largo, inclinado respecto a la corriente, detecta exclusivamente la componente normal de la velocidad, dado

que la componente axial aparece multiplicando a los gradientes axiales de temperatura que, lógicamente, son pequeños. Por tanto, situando en un punto dado un mismo hilo con dos inclinaciones distintas tenemos dos relaciones entre u' y w' que nos permitirán obtener u' y w' .

Las figuras 3-20 a y b muestran la orientación de un mismo hilo caliente en dos barridos consecutivos de una sección transversal de la estela, realizados para las mismas condiciones de la corriente exterior.

En nuestro caso particular, el hilo está en un plano vertical, su diámetro y longitud son iguales a los del utilizado en el apartado anterior y $\alpha = 45^\circ$.

Cuando la inclinación de la sonda es la correspondiente a la figura 3-20 a tenemos:

1.º Para los valores medios:

$$E_a^2 = E_{0a}^2 + B_a (U \cos \alpha + W \sin \alpha)^{1/2}. \quad (4a)$$

2.º Para los instantáneos:

$$(E_a + e'_a)^2 = E_{0a}^2 + B_a [(U + u') \cos \alpha + (W + w') \sin \alpha]^{1/2}. \quad (5a)$$

Análogamente, cuando la inclinación de la sonda es la correspondiente a la figura 3-20 b, tendremos:

1.º Para los valores medios:

$$E_b^2 = E_{0b}^2 + B_b (U \cos \alpha - W \sin \alpha)^{1/2}. \quad (4b)$$

2.º Para los instantáneos:

$$(E_b + e'_b)^2 = E_{0b}^2 + B_b [(U + u') \cos \alpha - (W + w') \sin \alpha]^{1/2}. \quad (5b)$$

Las constantes E_0 y B se deducen de sendos tarados independientes para las dos posiciones de la sonda. De las ecuaciones (4a) y (4b) deducimos:

1.º Inclinación del vector velocidad media temporal:

$$\tan \beta = \frac{W}{U} = \frac{1}{\tan \alpha} \frac{\left(\frac{E_a^2 - E_{0a}^2}{B_a} \right)^2 - \left(\frac{E_b^2 - E_{0b}^2}{B_b} \right)^2}{\left(\frac{E_a^2 - E_{0a}^2}{B_a} \right)^2 + \left(\frac{E_b^2 - E_{0b}^2}{B_b} \right)^2}. \quad (6)$$

2.º Módulo de dicho vector

$$\sqrt{U^2 + W^2} = \frac{1}{2 \cos \alpha \cos \beta} \left[\left(\frac{E_a^2 - E_{0a}^2}{B_a} \right)^2 + \left(\frac{E_b^2 - E_{0b}^2}{B_b} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Para calcular los esfuerzos de Reynolds suponemos, como antes, que las velocidades de agitación son

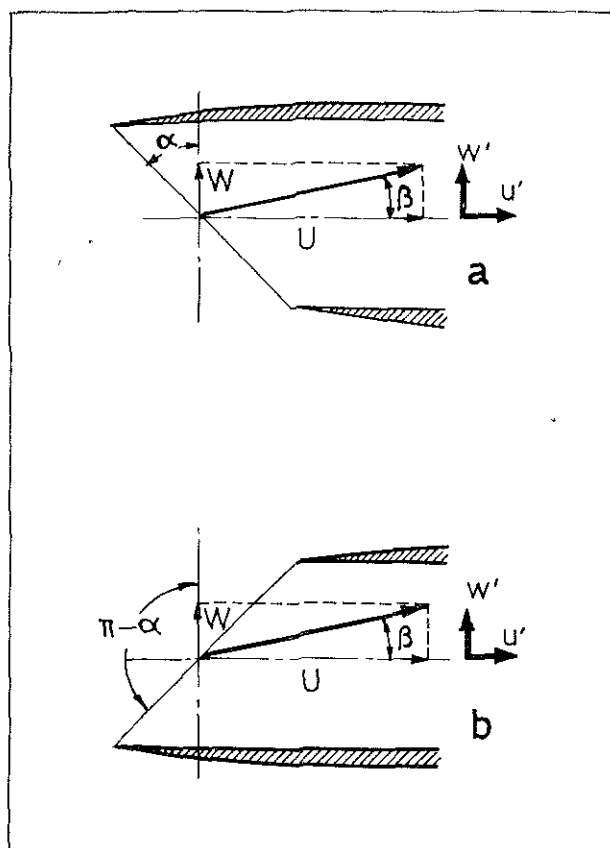


Fig. 3-20. — Orientaciones de un mismo hilo para medir esfuerzos de Reynolds.

pequeñas. Con esta hipótesis reducimos las ecuaciones (5 a) y (5 b) a las siguientes:

$$E_a^2 + 2 E_a e'_a = E_0^2 + B_a (U \cos \alpha + W \sin \alpha)^{1/2} \left(1 + \frac{u' \cos \alpha + w' \sin \alpha}{2 (U \cos \alpha + W \sin \alpha)} \right) + 0 \left(\left(\frac{u'}{U} \right)^2 \right) \quad (8 a)$$

y

$$E_b^2 + 2 E_b e'_b = E_0^2 + B_b (U \cos \alpha - W \sin \alpha)^{1/2} \left(1 + \frac{u' \cos \alpha - w' \sin \alpha}{2 (U \cos \alpha - W \sin \alpha)} \right) + 0 \left(\left(\frac{u'}{U} \right)^2 \right) \quad (8 b)$$

que, teniendo en cuenta las (4 a) y (4 b) se reducen, después de tomar valores medios y combinarlas apropiadamente, a:

$$\frac{\overline{u' w'}}{U^2 + W^2} = \frac{2}{\sin 2 \alpha} \left[\cos^2 (\alpha + \beta) \left(\frac{2 E_b}{E_b^2 - E_0^2} \right)^2 \overline{e'^2_b} - \cos^2 (\alpha + \beta) \left(\frac{2 E_a}{E_a^2 - E_0^2} \right)^2 \overline{e'^2_a} \right]. \quad (9)$$

En el caso, bastante normal, de $\beta = 0$, la ecuación (9) se reduce a:

$$-\frac{\overline{u' w'}}{U^2} = \operatorname{ctg} \alpha \left[\left(\frac{2 E_b}{E_b^2 - E_0^2} \right)^2 \overline{e'^2_b} - \left(\frac{2 E_a}{E_a^2 - E_0^2} \right)^2 \overline{e'^2_a} \right]. \quad (10)$$

BIBLIOGRAFIA

1. KOVASZNAV, L. S. G.: "Turbulence Measurements" en "Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion". Vol. IX High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion. R. W. Ladenburg Ed. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954. Article F, 2 pp. 219-276.
2. HINZE, J. O.: "Turbulence". McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1959, Chap. 2, pp. 75-122.
3. DRYDEN, H. L.: "A Review of the Statistical Theory of Turbulence". Quarterly of Applied Mathematics 1, 7-42 (1943). Publicado también en "Turbulence". S. K. Friedlander y L. Topper Ed. Interscience Publishers, Inc. New York, 1961, pp. 115-150.
4. Lighthill, M. J.: "Jet Noise". AIAA Journal. Volumen 1, No. 7, July 1963, pp. 1507-1517.

ESTELAS DE LAS BARRERAS

1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados fundamentales de la exploración de las estelas correspondientes a las distintas barreras.

Las magnitudes medidas son: módulo del vector velocidad media temporal, nivel de turbulencia y esfuerzos de Reynolds. Las exploraciones corresponden a cuatro secciones comprendidas corriente abajo, entre 0 y unas 10 veces la altura h , de la barrera.

Los números de Reynolds de los ensayos son, para los resultados presentados en este capítulo, del orden de 2×10^4 , en función de la altura de la barrera. El falso suelo de la cámara de ensayos es liso, está redondeado en el borde de ataque y su longitud total, corriente abajo de la barrera, es de 1540 mm. El viento incidente es uniforme.

Realizar experimentos en un dominio en el que no existe un apoyo teórico suficientemente sólido, es extremadamente difícil. Por esta razón se ha tratado de correlacionar los resultados con el fin de que, al mismo tiempo sea posible juzgar la validez de las medidas, y obtener fórmulas semiempíricas sencillas que puedan ser utilizadas por el ingeniero. Los resultados presentados parecen sugerir que el campo de velocidades se aproxima al correspondiente a una zona de cortadura, prácticamente isobara, cuyo origen está situado en el plano de la barrera y a $1.5 h$ sobre el suelo. Los perfiles de velocidad en las diferentes estelas difieren en el valor de la velocidad media inmediatamente detrás de la barrera. Con este dato y las fórmulas clásicas correspondientes a zonas turbulentas de cortadura, es posible predecir la estructura de la estela, al menos para barreras de porosidades análogas a las utilizadas en los ensayos.

La porosidad geométrica, σ , de una barrera es la relación entre el área de las aberturas y la sección total. Recientemente Castro [1] ha publicado un estudio bastante detallado sobre la influencia de la porosidad en las características de estelas de chapas aisladas, normales al viento, perforadas con agujeros circulares. La aportación fundamental es la de mostrar que, dependiendo de la porosidad, existen dos configuraciones de estela muy distintas, con una transición brusca para $\sigma = 0.2$.

Para porosidades menores de 0.2, las dos capas de cortadura que se desprenden de los bordes de las

chapas, aisladas y bidimensionales, son inestables e interaccionan en la estela próxima, formando calles de torbellinos, con una frecuencia de desprendimiento determinada. Al aumentar la porosidad y, por tanto, la inyección de fluido en la estela desde la placa, se impide la interacción entre las capas y se retrasa la formación de los torbellinos, desapareciendo la pulsación de baja frecuencia, al menos en las proximidades de la barrera.

La curva que da al coeficiente de resistencia del obstáculo en función de la porosidad, presenta un cambio brusco para $\sigma = 0.2$, lo que parece indicar que cesa el desprendimiento de los torbellinos alternados.

Otra característica importante, es la presencia, cuando la porosidad es pequeña, de una burbuja de recirculación, que se aleja al aumentar la porosidad y termina por desaparecer. En [1] se comprueba que existe recirculación incluso para $\sigma = 0.305$, pero, para $\sigma = 0.425$, la velocidad detrás de la estela a lo largo del eje x , presenta un mínimo positivo para $x/2h \simeq 4$, lo que indica que no existe recirculación.

En lo referente a las aplicaciones agrícolas, las estelas de obstáculos poco porosos presentan ciertas características poco deseables. Por una parte la agitación de las hojas, que puede ser muy grande en el contorno de la estela de tales barreras, acelera el proceso de deshidratación de las plantas, debido a que las flexiones alternadas a que son sometidos los tejidos vegetales contribuyen a expulsar el agua que contienen [2]. Por otra parte, la inyección de fluido en la estela, desde la barrera, aumenta la longitud de la zona protegida aun a costa de aumentar la velocidad mínima. Por estas razones, los valores de σ en la mayoría de las barreras que ensayaremos son del orden de 0.4.

El presente capítulo está ordenado de la siguiente forma: En 2 se hace una relación de las medidas que se presentan de cada barrera. En 3 se estudia de forma detallada la posible correlación semiempírica de que ya hemos hablado. En 4 se presentan y discuten los resultados correspondientes a todas y cada una de las barreras. Por razones de espacio y composición tipográfica las figuras correspondientes a este apartado están distribuidas uniformemente a lo largo de todo el capítulo. Con el fin de facilitar la lectura, se ha procurado explicar en 2 el contenido de las figuras, cada una de las cuales presenta la mayor cantidad de información compatible con la claridad (*).

(*) La composición final de estas figuras se debe a Jorge Andueza. Las perspectivas de las barreras son de Gonzalo Ortega.

Fig. 4-1. — Ejes y volumen fluido utilizados para estudiar la zona de mezcla.

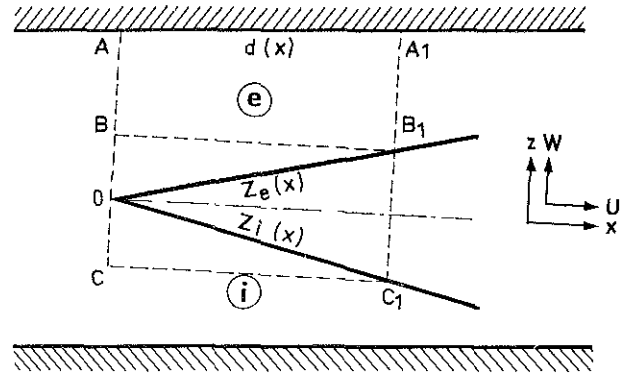
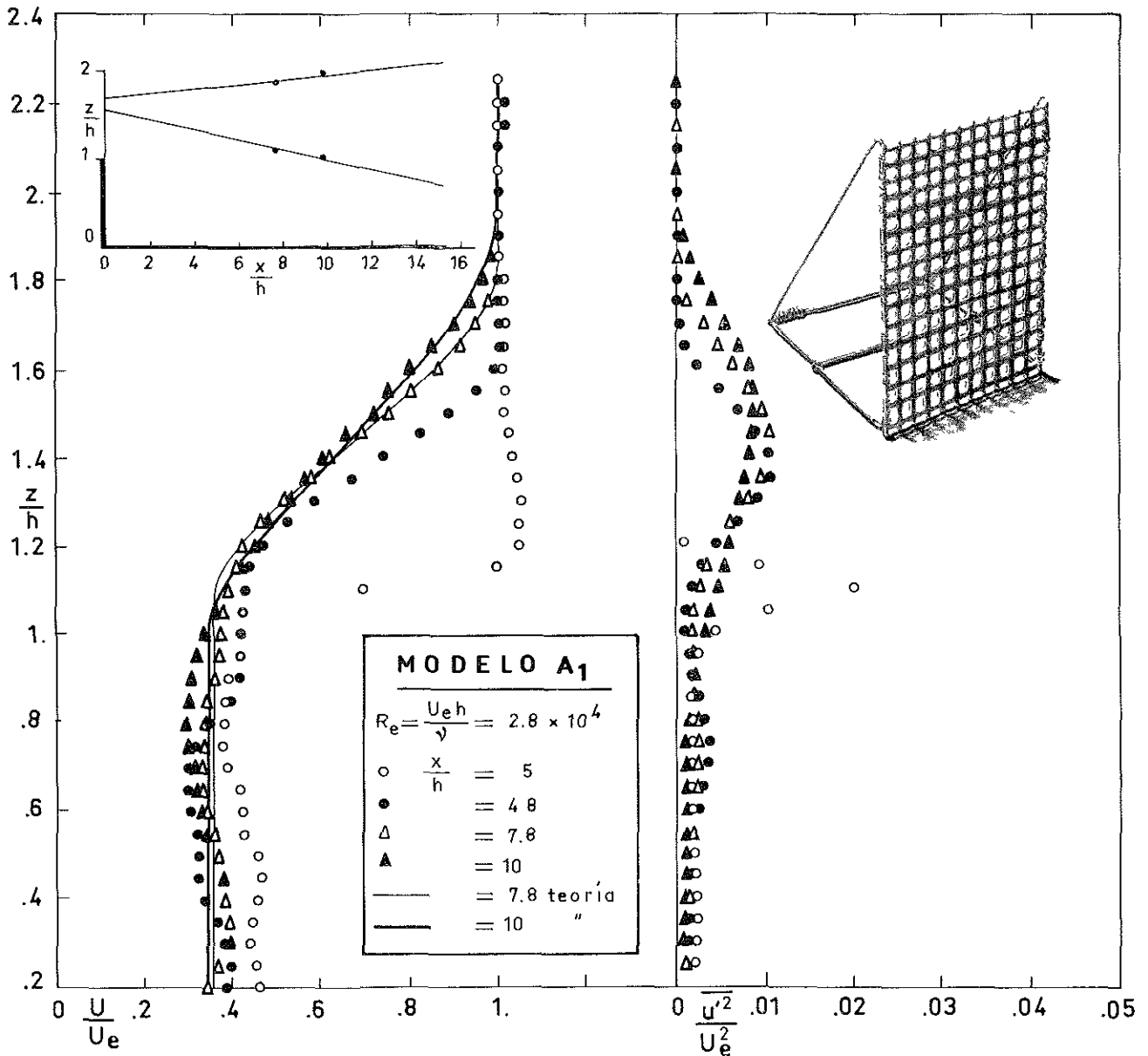


Fig. 4-2a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una malla.



2. CONTENIDO DE LAS FIGURAS.

Consideremos como típica la figura 4-2, *a*, correspondiente a la barrera A_1 . Dicha figura contiene:

a) En la parte inferior izquierda: los perfiles de velocidades correspondientes a valores, medidos varias veces y en días distintos, en cuatro secciones de la estela corriente abajo de la barrera. Las líneas de trazo continuo llamadas, bastante arbitrariamente, teoría, han sido obtenidas numéricamente de la forma que se explica en 3. Corresponden únicamente a secciones alejadas de la barrera donde, si la turbulencia es suficientemente grande, se han perdido muchas de las características tridimensionales debidas a los detalles geométricos de cada barrera.

Las velocidades en cada sección están adimensionalizadas con la exterior de dicha sección.

b) En la parte inferior derecha se presentan los perfiles de media cuadrática de la agitación turbulenta, $\overline{u'^2}$, adimensionalizados con el cuadrado de la velocidad exterior U_e . No se ha hecho ningún esfuerzo para comparar dichas medidas con las expresiones semiempíricas existentes, por dos razones fundamentales: 1.º, contrariamente a cuanto ocurre con los perfiles de velocidad media, los de agitación no permiten definir las fronteras de la línea de cortadura, y 2.º, habitualmente las comparaciones con teorías sencillas (teoría del camino de mezcla de Prandtl, del transporte de vorticidad de Taylor, etc.) sirven para poner en duda la validez de tales teorías, o para calcular parámetros empíricos con que ajustarlas a los experimentos. En cualquier caso las curvas son semejantes a las obtenidas, en experimentos análogos, por otros autores (figs. 2-4 a 2-7).

c) En la parte superior izquierda está representado el contorno de la zona de cortadura obtenida extrapolando, en una y otra dirección, los resultados correspondientes a las dos secciones exploradas de la estela más alejadas de la barrera. Por encima de la frontera superior la velocidad es uniforme en cada sección, lo mismo ocurre entre la frontera inferior y el suelo, aunque el valor de la velocidad sea, lógicamente, distinto del correspondiente a la corriente exterior.

Los puntos indicados en esta parte de la figura son los valores experimentales correspondientes a las dos secciones exploradas más alejadas de la barrera.

La extrapolación tiene un valor limitado y es, con seguridad, inapropiada en las proximidades de la barrera, pero útil corriente abajo de las dos últimas secciones.

La parte del eje $x = 0$ señalada con trazo grueso, corresponde a la longitud del falso suelo utilizado para los ensayos. La desaparición del suelo a cierta distancia corriente abajo, falsea las características de la estela alejada, sin embargo, su efecto en las medidas no parece apreciable.

d) En la parte superior derecha aparece una perspectiva del modelo utilizado en los ensayos.

La figura 4-2, *b*, presenta, en la parte izquierda, los esfuerzos turbulentos de Reynolds, y en la derecha las inclinaciones del vector velocidad media.

3. POSIBLE CORRELACION SEMIEMPÍRICA.

Los ensayos presentados aquí son limitados en muchos aspectos. Vamos a referirnos ahora a las limitaciones derivadas del hecho de que, por razones de espacio, no es posible explorar perfiles de la estela situados, corriente abajo, a distancias de la barrera mayores que unas diez veces la altura de ésta. Dado que, por otra parte, la hipótesis de semejanza, mencionada en la introducción al capítulo 2, sólo es válida a partir de distancias mucho mayores, queda una amplia zona no explorada en la que sería interesante disponer de datos semiempíricos, de aplicación sencilla y general, que sirvieran para valorar el mérito de las distintas barreras.

Del análisis de los resultados experimentales, que presentaremos más adelante, parece deducirse que, para distancias del orden de siete veces la altura de la barrera, los perfiles de velocidades son análogos a los de una capa de cortadura que separa dos corrientes uniformes paralelas de velocidades U_i y U_e . Si esto se confirma, será posible extrapolar las medidas realizadas, utilizando la teoría de chorros bidimensionales, extensamente estudiada, hasta distancias de la barrera mucho mayores que las alcanzadas en los experimentos.

Supuesto válido el modelo indicado, para definir el perfil adimensional de velocidades en una sección de la estela de la barrera, son necesarios tres datos: La relación $m = U_i/U_e$; la anchura z_i , de la zona inferior, medida respecto al suelo, y la anchura, $b = z_e - z_i$, de la capa de cortadura propiamente dicha.

En la zona de cortadura se puede aproximar el perfil de velocidades mediante cualquiera de las expresiones semiempíricas existentes. Dado que los resultados son, en cualquier caso, prácticamente idénticos, utilizamos la siguiente relación de Schlich-

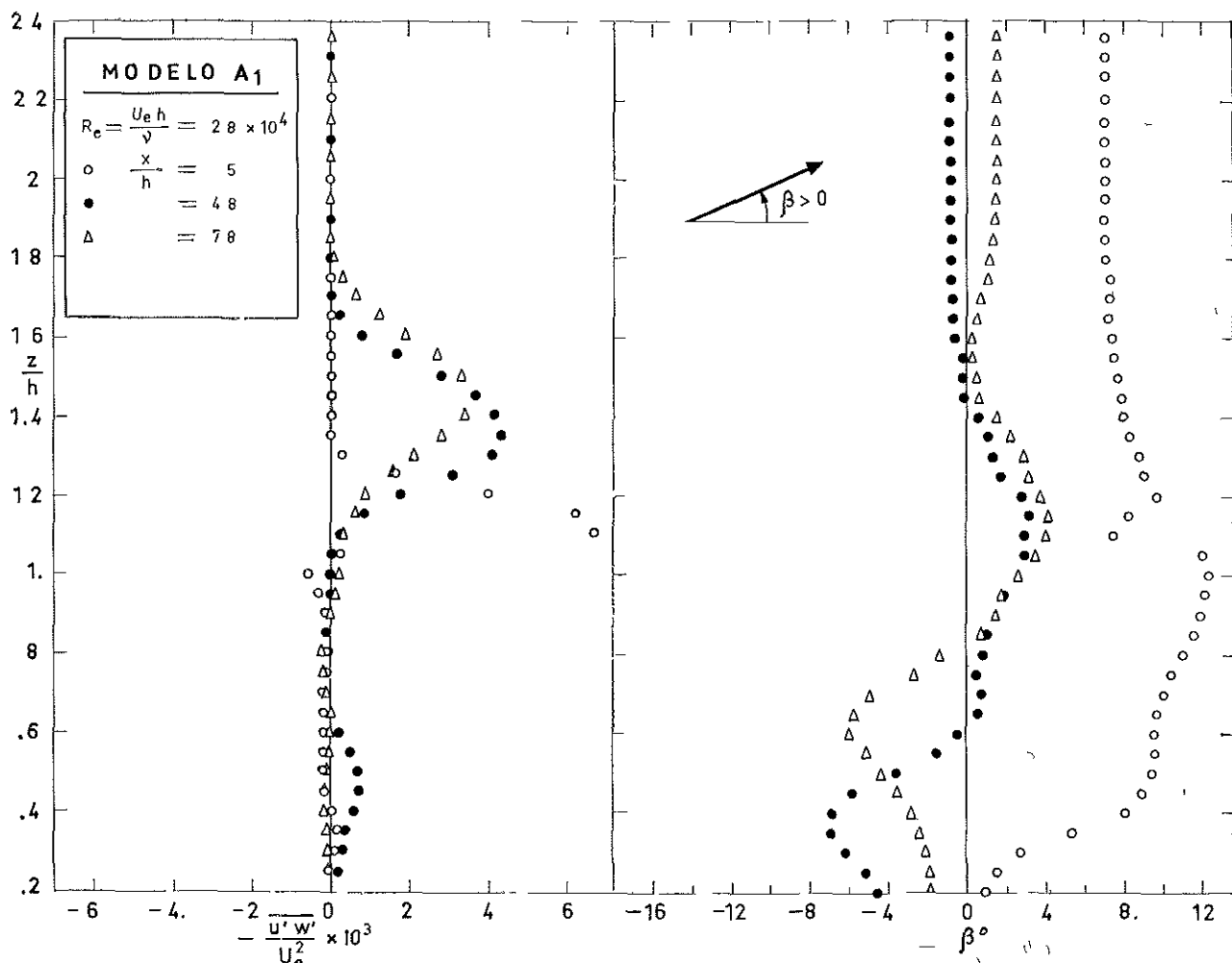


Fig. 4-2b — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela de una malla.

ting [3], [4], porque, siendo suficientemente aproximada, da lugar a expresiones muy sencillas:

$$\frac{U_e - U}{U_e - U_i} = (1 - \eta^{1.5})^2, \quad (1)$$

siendo $\eta = (z - z_i)/b$.

De acuerdo con lo expuesto, bastará deducir tres datos de los perfiles experimentales de velocidad, para definir las características de la sección correspondiente de la estela. Parece oportuno que los datos procedan de condiciones integrales deducidas de dichos perfiles experimentales. En nuestro caso se han utilizado los tres siguientes: el espesor de desplazamiento δ^+ , el espesor de impulso θ y el espesor de disipación de energía δ^{**} . Las definiciones, junto con sus valores en función de m , z_i y b , su-

puesta válida la ecuación (1), se incluyen en la tabla 1'.

Mediante integración numérica de las curvas experimentales obtenidas a partir de los perfiles de velocidades correspondientes a las dos secciones de la estela más alejada de la barrera, se calculan los valores de δ^+ , θ y δ^{**} , de los que se deducen los de m , z_i y b .

Los resultados se resumen en las dos primeras tablas de la página 35. La primera (tabla 2, a) corresponde a una sección distante 775 mm de la barrera. La segunda (b) a otra distante 991 mm.

En las figuras 4-2 a 4-16 se comparan los perfiles de velocidades experimentales con los obtenidos en la forma que se acaba de explicar (líneas de trazo continuo). La aproximación parece buena en general.

TABLA 1

	Definición [3]	Valor en nuestro caso particular
δ^*	$\int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dz$	$(1-m)(z_i + bA_1)$; $A_1 = 0.450$
θ	$\int_0^\infty \frac{U}{U_e} \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dz$	$(1-m)(mz_i + b(A_1 - (1-m)A_2))$; $A_2 = 0.316$
δ^{**}	$\int_0^\infty \frac{U}{U_e} \left(1 - \frac{U^2}{U_e^2}\right) dz$	$(1-m)(m(1+m)z_i + b(2A_1 - 3(1-m)A_2 + (1-m)^2A_3))$; $A_3 = 0.251$

$$A_i = \int_0^1 (1-\eta^{1.5})^2 d\eta$$

De las tablas 2, a y 2 , b deducimos las dos consecuencias siguientes:

a) La configuración es, en general, no isobara; dado que m varía.

b) La limitada evidencia existente parece indicar que la capa de cortadura se ensancha de acuerdo con la ley [4]:

$$\frac{db}{dx} = c \frac{1-m}{1+m}, \quad (2)$$

donde c es del orden de 0.2.

Para estudiar la zona de mezcla incompresible no isobara que se comporta en las secciones a y b , como la estela de una barrera, utilizamos el método de Abramovich [4], haciendo uso de las siguientes hipótesis simplificativas:

1.º La presión es independiente de z , pero puede variar linealmente con x . El que la presión sea aproximadamente constante en cada sección es consecuencia del hecho de que el espesor de la estela es mucho menor que su longitud. La variación *lineal* de la presión con x representa una hipótesis limitativa, pero es la única que se puede hacer cuando se intenta definir la zona de mezcla a partir de datos experimentales procedentes, exclusivamente, de dos secciones de la estela.

2.º Para valores dados de la velocidad a uno y otro lado de la zona de mezcla, los perfiles de velocidad en dicha zona son insensibles a los gra-

dientes de presión. Esta hipótesis ha sido comprobada experimentalmente en muchas ocasiones. Véase, por ejemplo, [5].

3.º La ley de crecimiento (2) es válida en este caso, pero m es función de x , puesto que los gradientes de presión modifican relativamente más la velocidad pequeña que la grande.

Consideremos la configuración representada en la figura 4-1. En ella, el subíndice e indica variables correspondientes a la zona exterior, y el i , las correspondientes a la zona próxima al suelo. El subíndice adicional 0 indica valores correspondientes a la supuesta sección inicial de la mezcla.

Dividiremos el estudio que sigue en tres partes: A) Estudio de las zonas no viscosas situadas a uno y otro lado de la zona de mezcla. B) Ensanchamiento de la zona de mezcla. C) Inclínación de dicha zona respecto a la corriente no perturbada.

A) En cada una de las zonas no viscosas podemos aplicar la ecuación de Bernoulli para relacionar la presión en cada sección, que, como hemos dicho, es la misma a uno y otro lado de la zona de mezcla, con la presión en la sección inicial. Tenemos:

$$c_p(x) = \frac{p(x) - p(0)}{\frac{1}{2} \rho U_e^2} = 1 - \frac{1 - m_0^2}{1 - m^2} \quad (3)$$

B) Para estudiar el ensanchamiento de la zona de mezcla, suponemos localmente válida la ecuación (2), de acuerdo con la tercera de las hipótesis

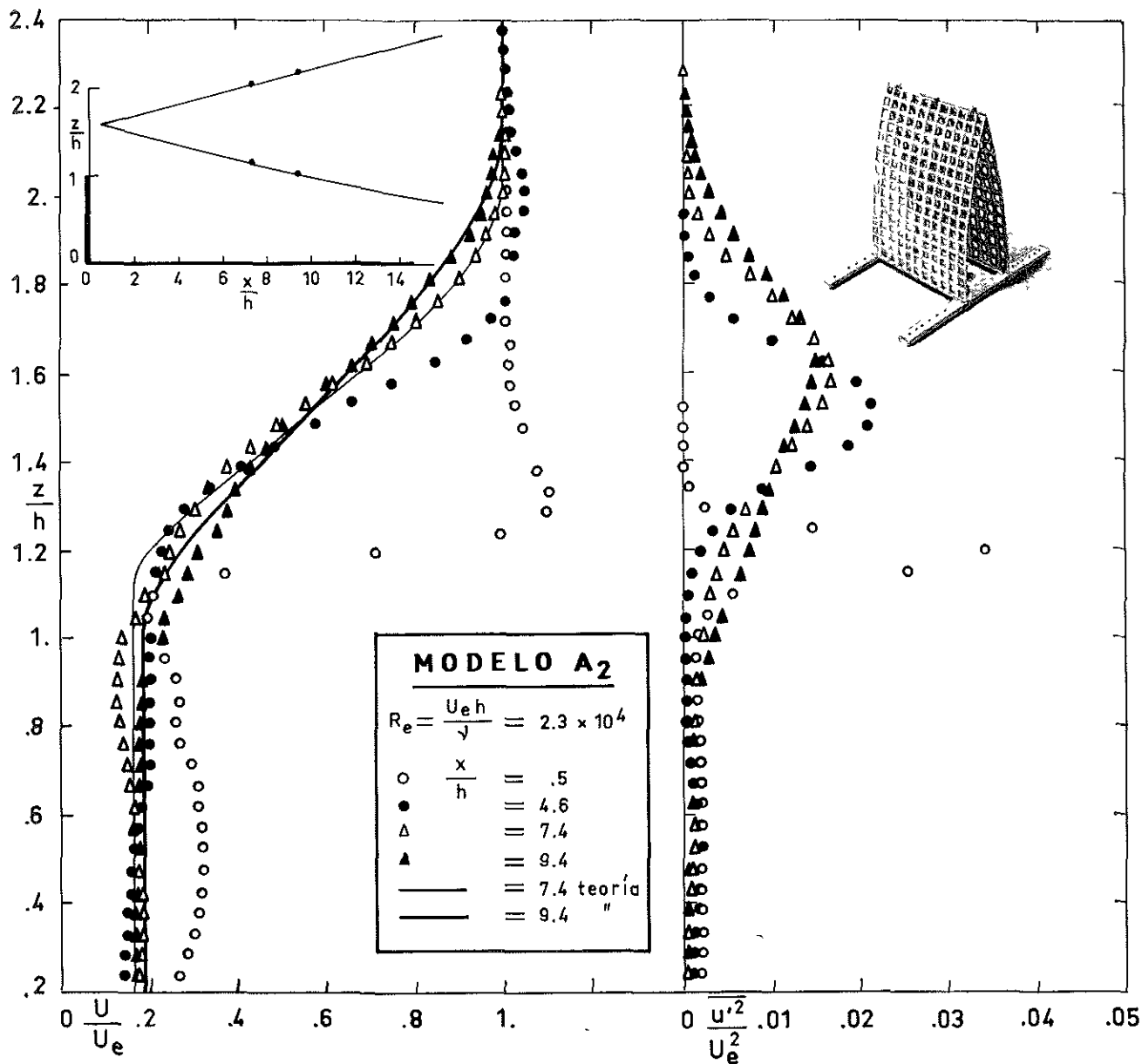


Fig. 4-3a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un diedro formado por dos mallas.

enunciadas anteriormente. Si eliminamos m , a la vista de (3), tenemos:

$$\frac{db}{dx} = c \frac{1 - m_0}{1 + m_0} + 2c \frac{m_0 - c_p - \sqrt{(1 - c_p)(m_0^2 - c_p)}}{1 - m_0^2} \quad (4)$$

que se integra inmediatamente, resultando:

$$\int_0^x \frac{db}{dx} \frac{dc_p}{dx} dx = \frac{c}{1 - m_0^2} \left[(1 - m_0)^2 \frac{c_p}{2} + \left(c_p - \frac{1 + m_0^2}{2} \right) (m_0 - \sqrt{(1 - c_p)(m_0^2 - c_p)} - c_p) + \frac{(1 - m_0^2)^2}{4} \log_e \left(1 + 2 \frac{m_0 - \sqrt{(1 - c_p)(m_0^2 - c_p)} - c_p}{(1 - m_0)^2} \right) \right] \quad (5)$$

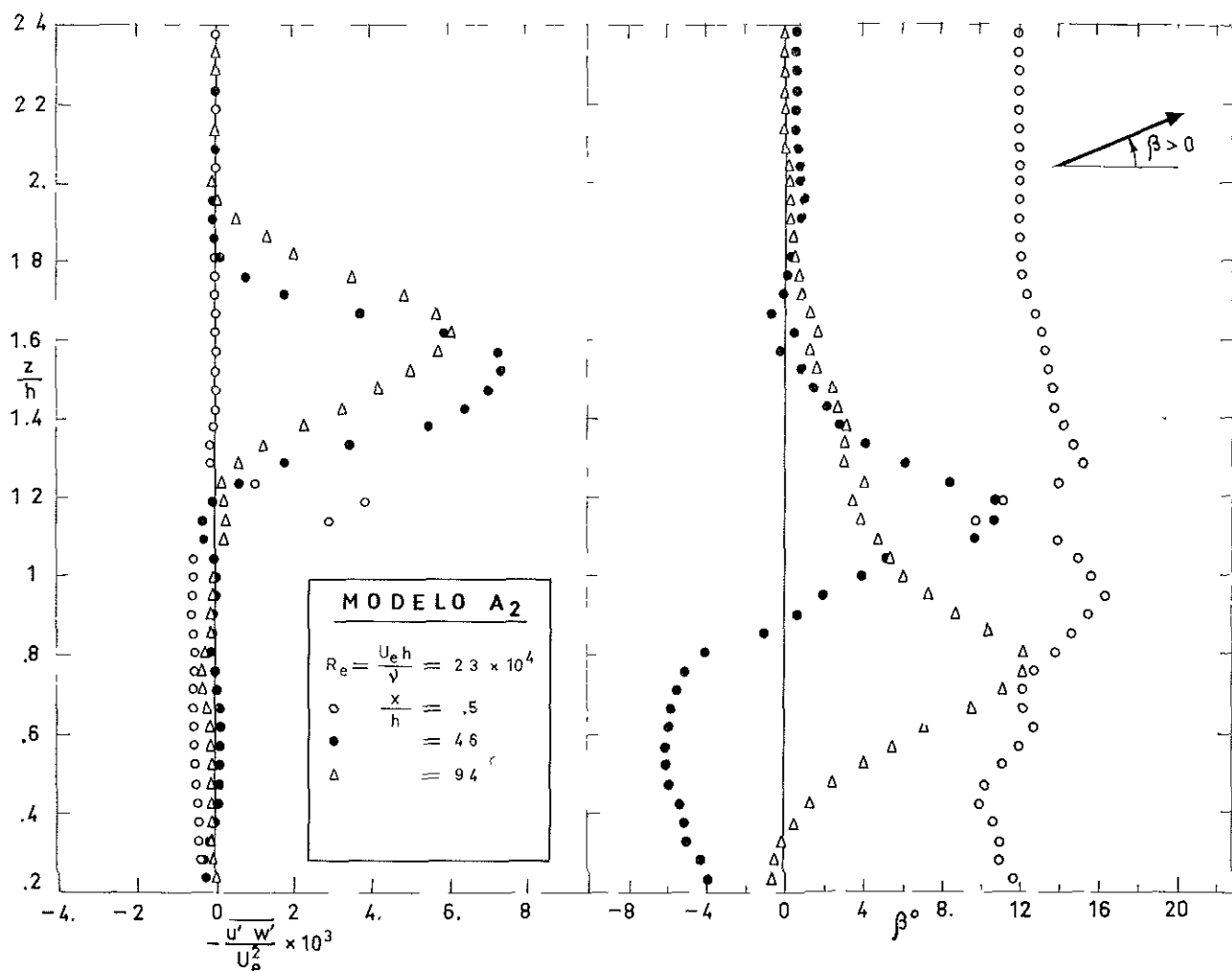


Fig. 4-3b. — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela del diedro formado por dos alas de la figura anterior.

La ecuación (5) se reduce, en el caso isobaro, a:

$$b = c x \frac{1 - m_0}{1 + m_0} \quad (5a)$$

Si, a falta de mejor información, suponemos que c_p es función lineal de x , el primer miembro de (5) se reduce a $b c_p / x$. En los casos en que esta aproximación no parezca suficiente, es posible utilizar distribuciones de $c_p(x)$ más ajustadas a la realidad, para obtener $b(x)$.

Las ecuaciones (3) y (5), aplicadas a las dos secciones de la estela en las que se conoce m y b , permiten calcular, supuesta lineal la variación

con x de la presión, las cuatro incógnitas siguientes: La posición, x_0 , de la sección inicial de la zona de mezcla respecto a la barrera; la relación inicial de velocidades m_0 ; el gradiente de c_p y la constante, c , de ensanchamiento de la zona de mezcla.

Falta únicamente orientar la zona de mezcla respecto a la corriente no perturbada.

C) Para ello, consideramos el elemento fluido B B₁ C₁ C de la figura 4-1, cuyas fronteras son paralelas a los ejes de referencia.

De la combinación de las ecuaciones de continuidad e impulso longitudinal aplicadas en forma integral a dicho elemento, deducimos:

$$(p_0 - p) b + \rho (U_{e0} - U_{i0}) \left(U_{e0} \bar{z}_e - \int_0^x W_e dx \right) = \rho \int_{z_i}^{z_e} (U^2 - U_{i0}^2) dz \quad (6)$$

De la ecuación de continuidad aplicada al elemento $A A_1 B_1 B$ deducimos:

$$U_{e0} (d_0 - z_e) + \int_0^x W_e dx = U_e (d - z_e)$$

que, llevada a (6) conduce a la ecuación siguiente:

$$\frac{d_0}{b} = \frac{d - z_e}{b} \sqrt{1 - c_p} + \frac{1}{1 - m_0} \left[(1 - c_p) \int_0^1 \left(\frac{U}{U_e} \right)^2 d\eta - m_0 \sqrt{1 - c} \int_0^1 \left(\frac{U}{U_e} \right) d\eta + \frac{1}{2} c_p \right] \quad (7)$$

donde, con el perfil de velocidades (1), las integrales del segundo miembro valen:

$$\int_0^1 \frac{U}{U_e} d\eta = 0.55 + 0.45 m \quad \int_0^1 \left(\frac{U}{U_e} \right)^2 d\eta = 0.416 + 0.268 m + 0.316 m^2.$$

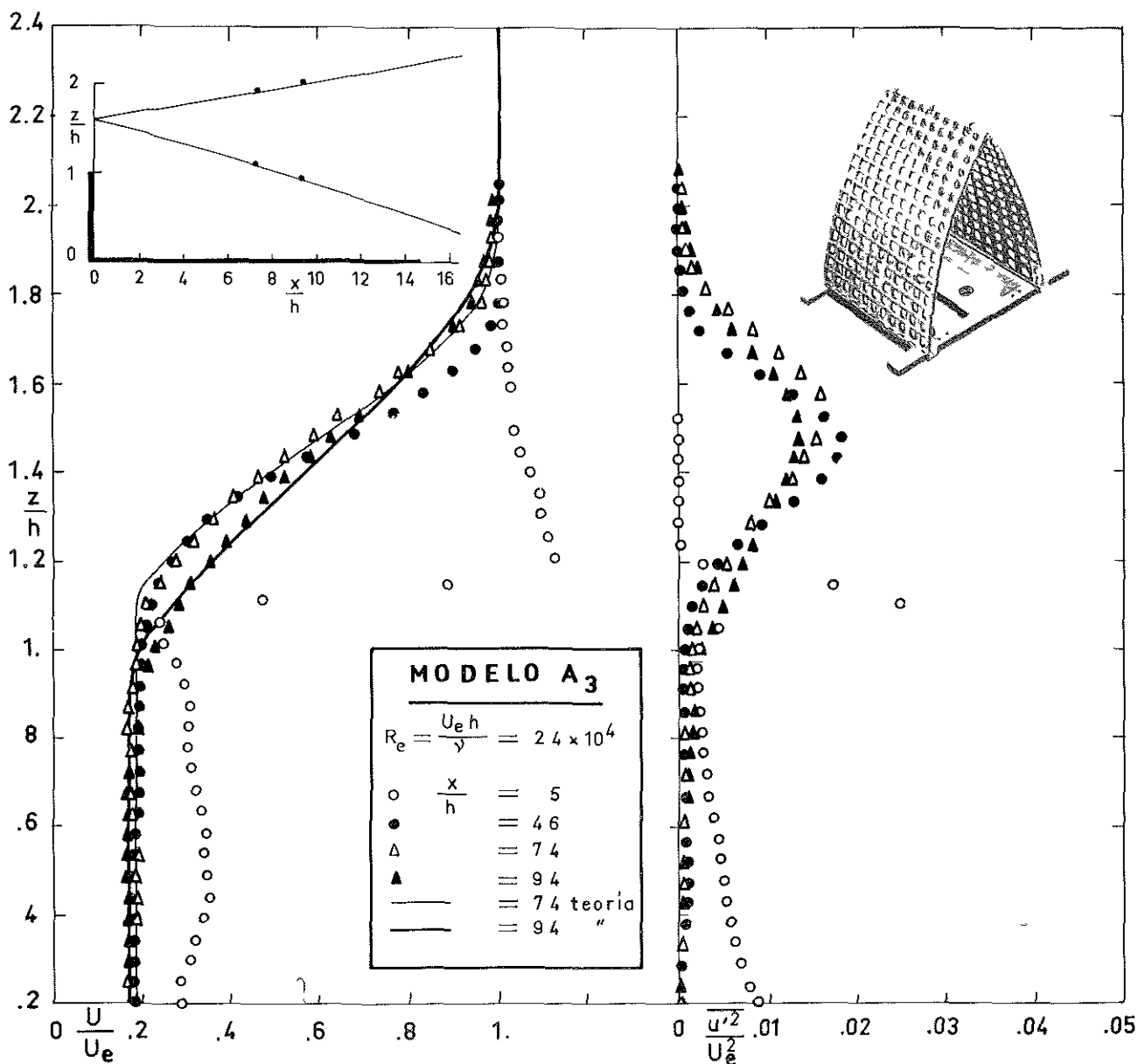


Fig. 4-4a — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un diedro formado por dos mallas.

La ecuación (7) permite calcular la ordenada, z_0 , del origen de la zona de mezcla si se dispone de datos sobre una sección de dicha zona. Conocida la posición de la sección inicial, las ecuaciones (5) y (7) definen la frontera de la zona.

La tabla 3 reúne, para cada barrera, los valores de los cinco parámetros: x_0 , z_0 , m_0 , c y c_p/x .

4. CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRERAS.

Este apartado tiene por objeto discutir los resultados obtenidos explorando las estelas de las distintas barreras.

4-A. Modelos A_1 , A_2 , A_3 y A_4 .

La barrera más sencilla está formada por una malla metálica o de plástico (polietileno, nylon o sarán) [6].

La malla utilizada en estos ensayos es de polietileno y tiene una porosidad $\sigma = 0,45$. Su uso está bastante extendido en España, pese al envejecimiento relativamente rápido que experimenta el polietileno a la intemperie.

La barrera A_1 , que está formada por una sola malla (fig. 4-2), tiene el inconveniente de decelerar poco la corriente incidente. Como contrapartida presenta las ventajas de no introducir un nivel de turbulencia excesivo y, debido a que el proceso de mezcla no es muy activo, proteger una zona relativamente grande.

El coeficiente de resistencia aerodinámica, calculado a partir del espesor de impulso en la sección más alejada de la estela, es $C_D = 0,76$, valor bastante grande. La barrera es muy sensible estructuralmente a los efectos mecánicos del viento, y en esto reside su mayor inconveniente práctico.

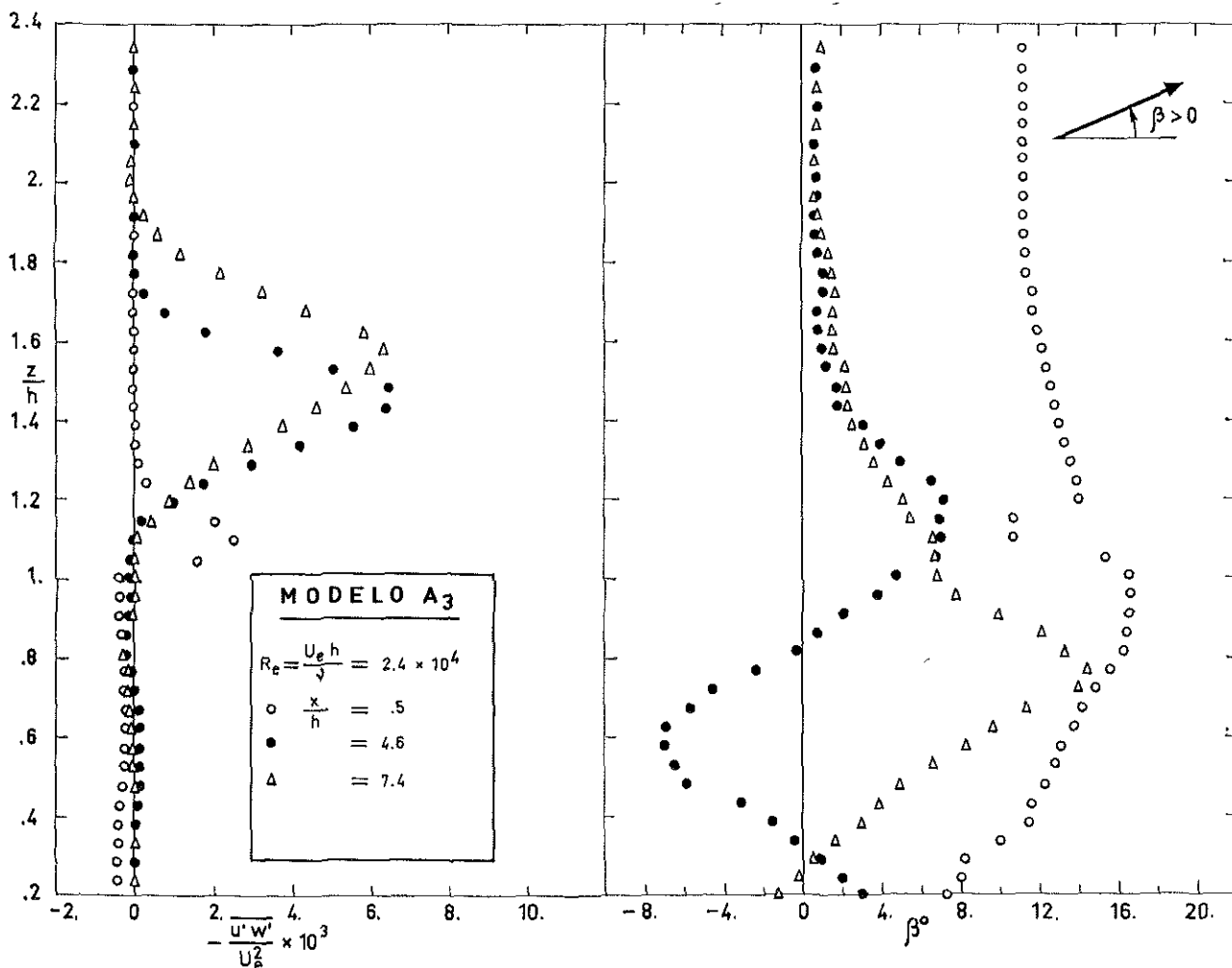


Fig. 4-4b. — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela del diedro formado por dos mallas de la figura anterior.

TABLA 2a

	δ^*	θ	δ^{**}	m	z_2	b
A ₁	9 25	3 73	5 35	0 358	11.00	7 55
A ₂	13 48	3 12	4 17	0 165	11 82	9 61
A ₃	12 64	3 11	4 15	0 185	11 60	8 68
A ₄	11 46	3 20	4 41	0 195	9 22	11 14
B	8 64	3 39	4 86	0 336	9 30	8 25
C ₁	13.67	3 86	5 30	0 204	11 49	12 62
D ₁	12 84	3 21	4 34	0 179	11 10	10 09
D ₂	10 94	3 47	4 81	0 246	9 94	10 16
D ₃	12 40	3 92	5 46	0 238	10 70	12 41
D ₄	10 96	4 15	5 91	0 320	11 44	10 40
E	12 40	2 79	3 96	0 0965	7 16	14 59
F ₁	11 17	2 36	3 21	0 125	8 56	9 36
F ₂	12 00	1 85	2 58	0 0571	8 34	9 75
G ₁	24 00	3 30	4 63	0 0459	17 04	18 03
G ₂	18 73	2 66	3 79	0 0399	12 55	15 47

TABLA 2b

	δ^*	θ	δ^{**}	m	z_2	b
A ₁	9 46	3 81	5 50	0 346	10 24	9 40
A ₂	13 28	3 53	4 84	0 183	10 72	12 28
A ₃	12 46	3 14	4 30	0 169	9 91	11 27
A ₄	11 63	3 44	4 84	0 193	8 22	13 75
B	8 97	3 64	5 27	0 339	8 99	10 17
C ₁	13 66	3 93	5 55	0 172	8 79	17 14
D ₁	11 69	3 32	4 62	0 186	8 61	12 81
D ₂	10 95	3 53	4 99	0 226	8 21	13 19
D ₃	11 76	4 06	5 79	0 246	8 74	15 26
D ₄	10 64	4 09	5 90	0 307	9 58	12 84
E	12 35	3 27	4 72	0 108	5 67	18 16
F ₁	10 85	2 73	3 83	0 136	6 92	12 54
F ₂	11 80	2 30	3 34	0 049	6 03	14 19
G ₁	21 74	3 84	5 55	0 0454	12 25	23 40
G ₂	18 52	3 00	4 39	0 0289	10 30	19 51

Con el fin de estudiar la posibilidad de obviar los principales inconvenientes del modelo anterior: escasa deceleración del viento, elevada resistencia aerodinámica y pequeña rigidez estructural, se ensayaron las barreras A₂ y A₃, formadas por sendos diedros de malla cuyas aristas son horizontales y perpendiculares al viento incidente (figs. 4-3 y 4-4).

La resistencia aerodinámica de estas barreras disminuye al aumentar el ángulo diedro; el coeficiente vale $C_D = 0.67$ para la barrera A₂, y 0.60 para la A₃.

El nivel de la turbulencia introducida es todavía pequeño, aunque mayor que el de la A₁, y la velocidad mínima es aproximadamente la mitad de la correspondiente a dicha barrera. Sin embargo, el coeficiente, c , de ensanchamiento de la zona de mezcla, es prácticamente el mismo, de forma que la longitud de la zona protegida del viento es ligeramente inferior a la correspondiente a la barrera A₁.

La desventaja fundamental de estas barreras reside en su precio. Por otra parte, las dimensiones de las mallas existentes en el mercado no se adaptan bien a la construcción de barreras de altura apropiada.

El modelo A₄ (fig. 4-5) se diferencia de los anteriores en que las dos mallas están situadas en planos verticales, y sobre ellas hay una cubierta, cuyo objeto es conseguir una zona de baja presión que

deflecte hacia arriba el contorno superior de la zona de mezcla. En la práctica, el efecto no es muy acusado, y, en cambio, la estela de la cubierta introduce excesiva turbulencia en el campo próximo, y aumenta la resistencia aerodinámica del conjunto ($C_D = 0.68$).

T A B L A 3

	x_0/h	z_0/h	$10^3 c_p/x$	m_0	c
A ₁	-1 706	1 64	0 419	0 403	0 178
A ₂	0 673	1 58	-0 309	0 0777	0 176
A ₃	-0 001	1 62	0 275	0 234	0 172
A ₄	-1 542	1 55	0 037	0 203	0 179
B	-1 372	1 38	-0 109	0 323	0 179
C ₁	0 782	1 55	0 546	0 278	0 306
D ₁	0 020	1 46	-0 124	0 151	0 182
D ₂	-0 174	1 51	0 455	0 308	0 227
D ₃	-1 066	1 41	-0 187	0 202	0 216
D ₄	-1 699	1 44	0 392	0 370	0 217
E	-0 483	1 55	-0 109	0 0211	0 203
F ₁	1 695	1 37	-0 137	0 0869	0 192
F ₂	2 889	1 42	0 040	0 0721	0 228
G ₁	0 306	1 69	0 002	0 0475	0 272
G ₂	-0 825	2 05	0 035	0 0679	0 200

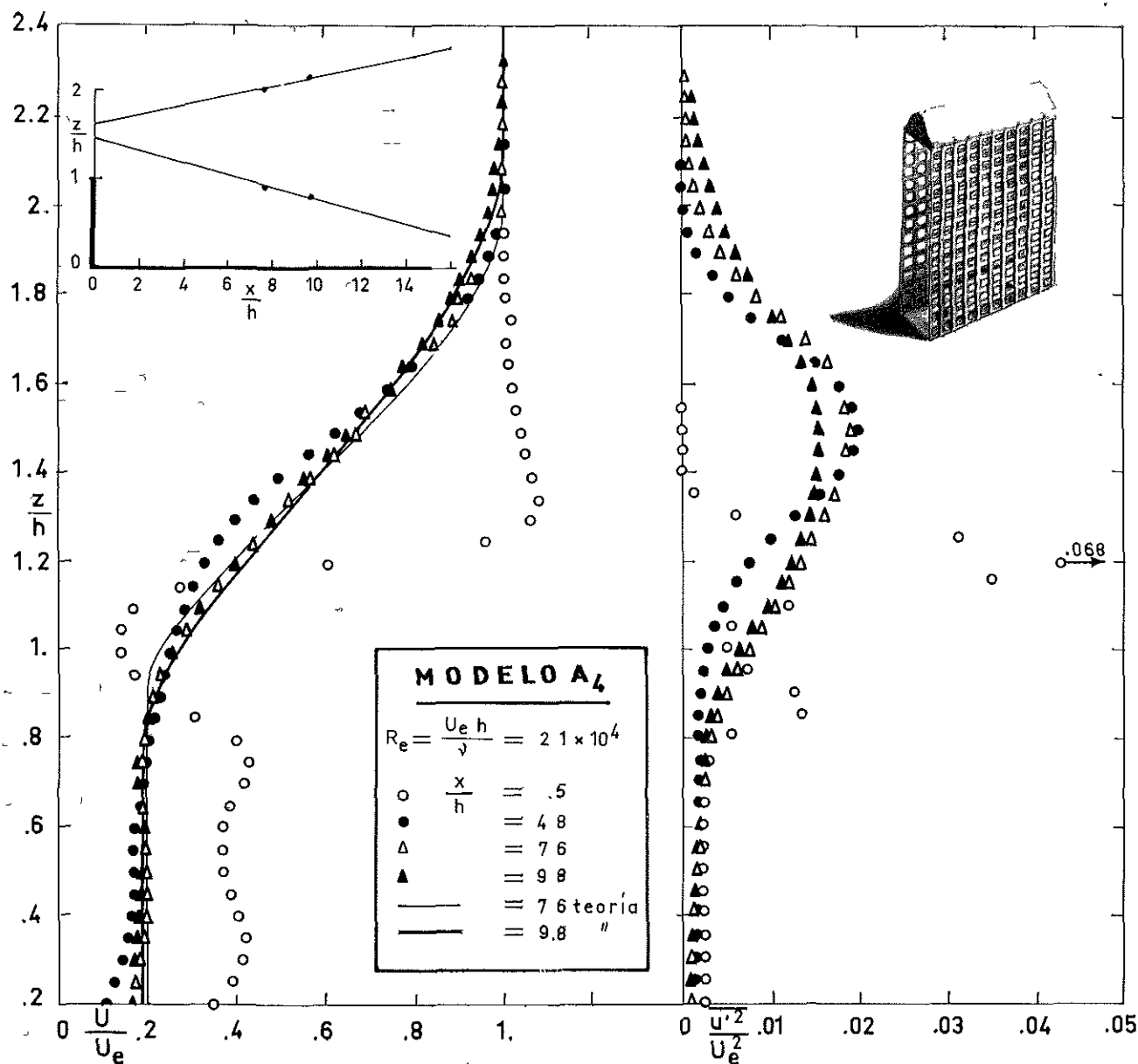


Fig. 4-5a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una malla doble con cubierta superior.

4-B. Modelo B.

Está formado por tablestacas de cañas o listones de madera. La longitud de cada listón es unas 35 veces su máxima anchura, y la porosidad de la barrera es $\sigma = 0.5$ [6]. Es usada muy extensamente, e incluso se fabrica en algunos países en escala semiindustrial para uno u otro de los cometidos siguientes: estabilizar la nieve, estabilizar dunas o proteger plantaciones [7].

El modelo ensayado parece introducir excesiva turbulencia por efecto de los travesaños horizontales de que está provisto (fig. 4-6).

Las características aerodinámicas de esta barrera son muy semejantes a las de la A₁. El coeficiente de resistencia vale $C_D = 0.73$, y la velocidad mínima y el parámetro de ensanchamiento de la zona de mezcla son prácticamente los mismos.

La duración de la barrera no es muy grande, y su coste, dependiente de las disponibilidades locales, difícil de precisar.

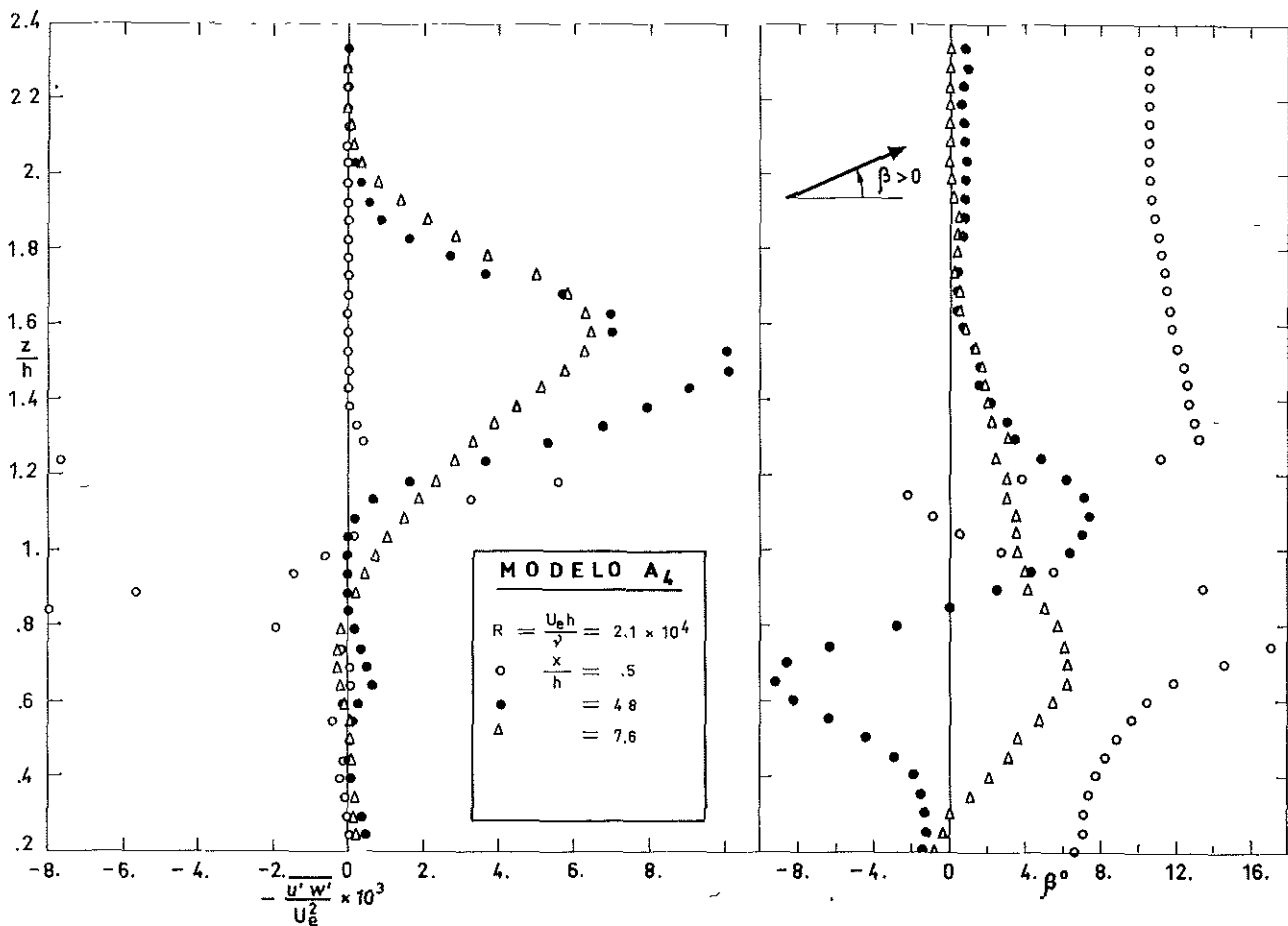


Fig. 4-5b. — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela de una malla doble con cubierta superior.

4-C. Modelo C_1 .

Representa un muro formado por un tabique de panderete, relativamente económico y de fácil instalación y conservación (fig. 4-7).

El modelo ensayado tiene una porosidad bastante pequeña, $\sigma = 0.35$, y el campo aerodinámico se caracteriza por un nivel de turbulencia relativamente grande en las proximidades de la barrera, y un gradiente adverso (positivo) de presiones apreciable en la zona situada entre cuatro y ocho veces la altura de la barrera. Por estas razones, la estela es comparativamente ancha y corta.

El coeficiente de resistencia, deducido del espesor de impulso en la sección de la estela más alejada de entre todas las exploradas, vale $C_D = 0.62$.

La agitación debida a la turbulencia de gran escala introducida por el muro es poco deseable desde el punto de vista de las aplicaciones agrícolas.

4-D. Modelos D_1 , D_2 , D_3 y D_4 .

Están formados por tres muros verticales próximos, cada uno de los cuales está constituido por cilindros, cuyo eje es horizontal y perpendicular al viento incidente. En los modelos D_1 y D_2 (figs. 4-8 y 4-9) todos los cilindros son iguales, mientras que en los modelos D_3 y D_4 (figs. 4-10 y 4-11) los cilindros correspondientes al muro intermedio tienen mayor diámetro. El eje de cada cilindro del muro intermedio equidista, en los modelos D_1 y D_3 , de

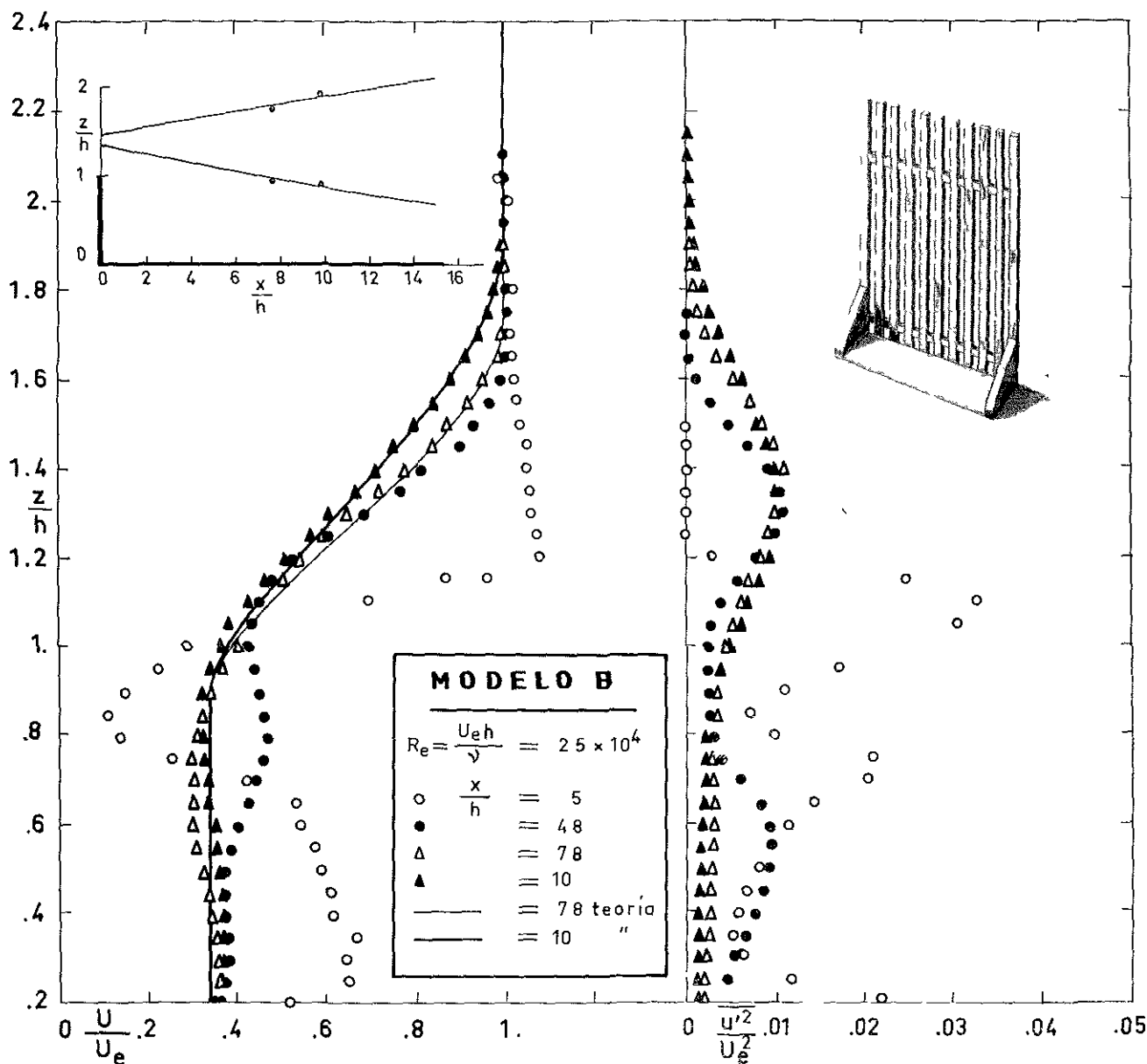


Fig. 4-6a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera de tablestacas.

los ejes de los cuatro cilindros más próximos. En cambio, en los modelos D_2 y D_4 los cilindros del muro intermedio están desplazados verticalmente, permitiendo un paso más franco del viento.

El campo aerodinámico cercano es extremadamente complicado y, como veremos más adelante, muy sensible a los efectos del número de Reynolds. La turbulencia introducida es muy grande.

Las velocidades mínimas son menores en las ba-

rreras D_1 y D_3 , que tienen menor porosidad, que en las D_2 y D_4 .

Sorprendentemente los gradientes de presión en las secciones más alejadas son desfavorables cuando la porosidad geométrica es grande y ligeramente favorables, o nulos, cuando es menor. La explicación puede residir en que, al aumentar la porosidad, se alarga la zona de deceleración de la corriente situada detrás de la barrera. En cambio, en el caso

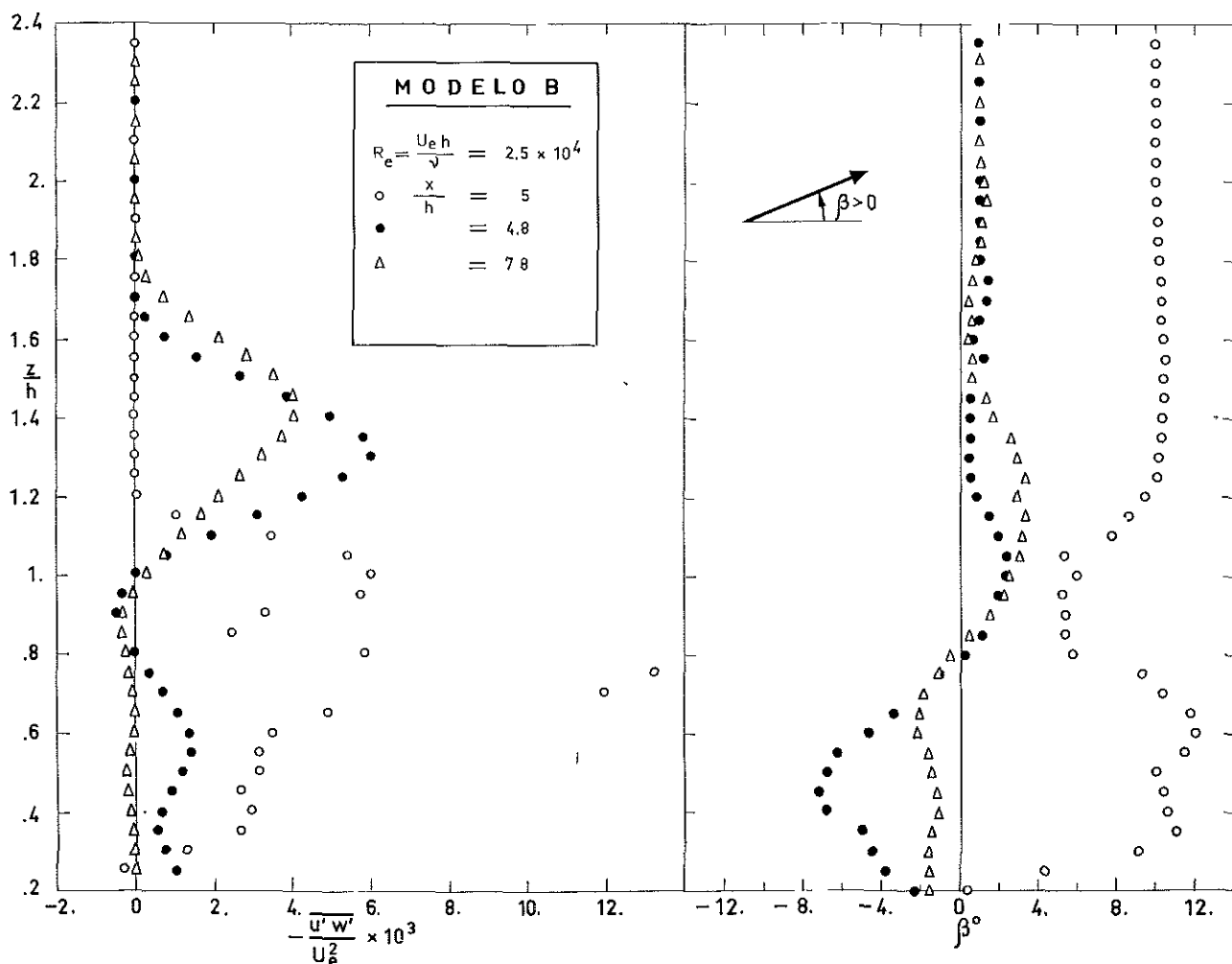


Fig. 4-6b.—Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela de una barrera de tablestacas.

de barreras poco porosas, la zona de deceleración es muy corta, y las secciones *a* y *b*, en las que se han hecho las medidas, están situadas por detrás del máximo de presión.

Los coeficientes de resistencia de las barreras que estamos considerando valen: 0.60 para la D_1 , 0.65 para las D_2 y D_4 y 0.68 para la D_3 .

4-E. Modelo E.

La idea de este muro se debe a un ingeniero agricultor tinerfeño (González del Carmen), quien, al parecer, ha llegado a ella por consideraciones puramente empíricas (*).

(*) Los autores fueron informados de la existencia de este tipo de barrera por el grupo de ingenieros de Geotechic.

Los perfiles en forma de pera (fig. 4-12) tienen por objeto deflectar la corriente hacia arriba, aprovechando la tendencia de los chorros a adherirse a las paredes curvas de los obstáculos cuando la presión en la pared es menor que en el exterior (Efecto Coanda).

En la práctica, el que todas las celdas funcionen de acuerdo con este esquema exige que la velocidad de la corriente que incide en el muro sea prácticamente horizontal en toda la altura de éste. Los ensayos de visualización con humo parecen indicar que donde la inclinación de la corriente hacia arriba es grande, cosa que ocurre en las proximidades del suelo, la presión en la base de los perfiles es muy grande en vez de ser pequeña, por lo que la corriente no se deflecta convenientemente.

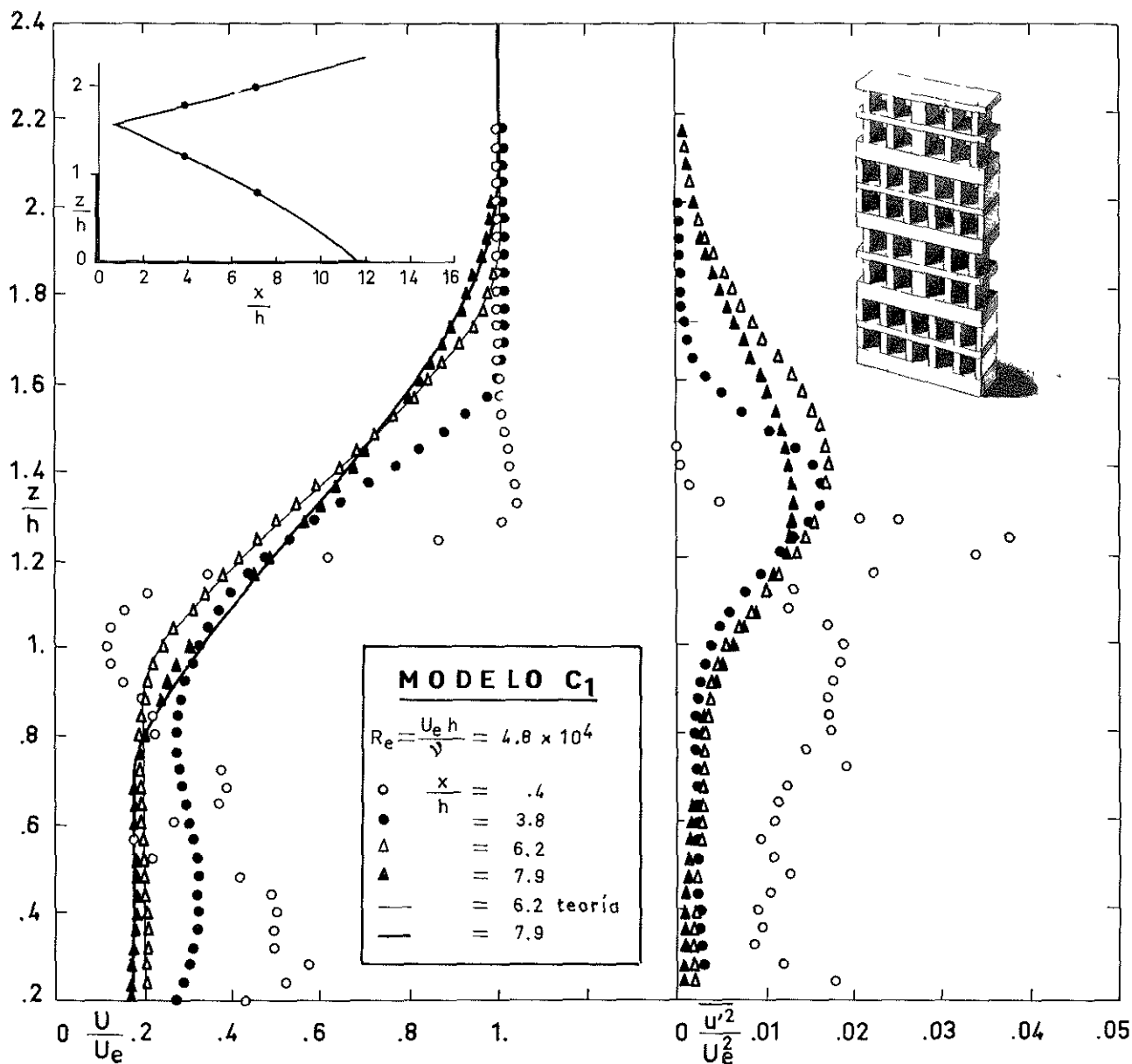


Fig. 4-7. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un muro de panderete.

Posibles soluciones del problema serían: a) Utilizar este tipo de barrera sólo para la parte superior del muro, empleando en la parte inferior una más sencilla y de mayor porosidad. b) Colocar los perfiles a diferente ángulo, de forma que la corriente incidente local sea aproximadamente tangente a la base de cada perfil. Esta segunda solución es poco práctica por ser excesivamente sensible a las características del terreno y al sentido de la corriente incidente.

El modelo ensayado en el túnel introduce mucha turbulencia. El coeficiente de resistencia aerodinámica es 0.66, y el comportamiento general es parecido al de la barrera D₁, si bien la velocidad mínima es aquí menor y el parámetro c mayor. Estas dos últimas consideraciones indican que la longitud de la zona protegida es menor que en los casos considerados anteriormente, con la excepción del modelo C₁.

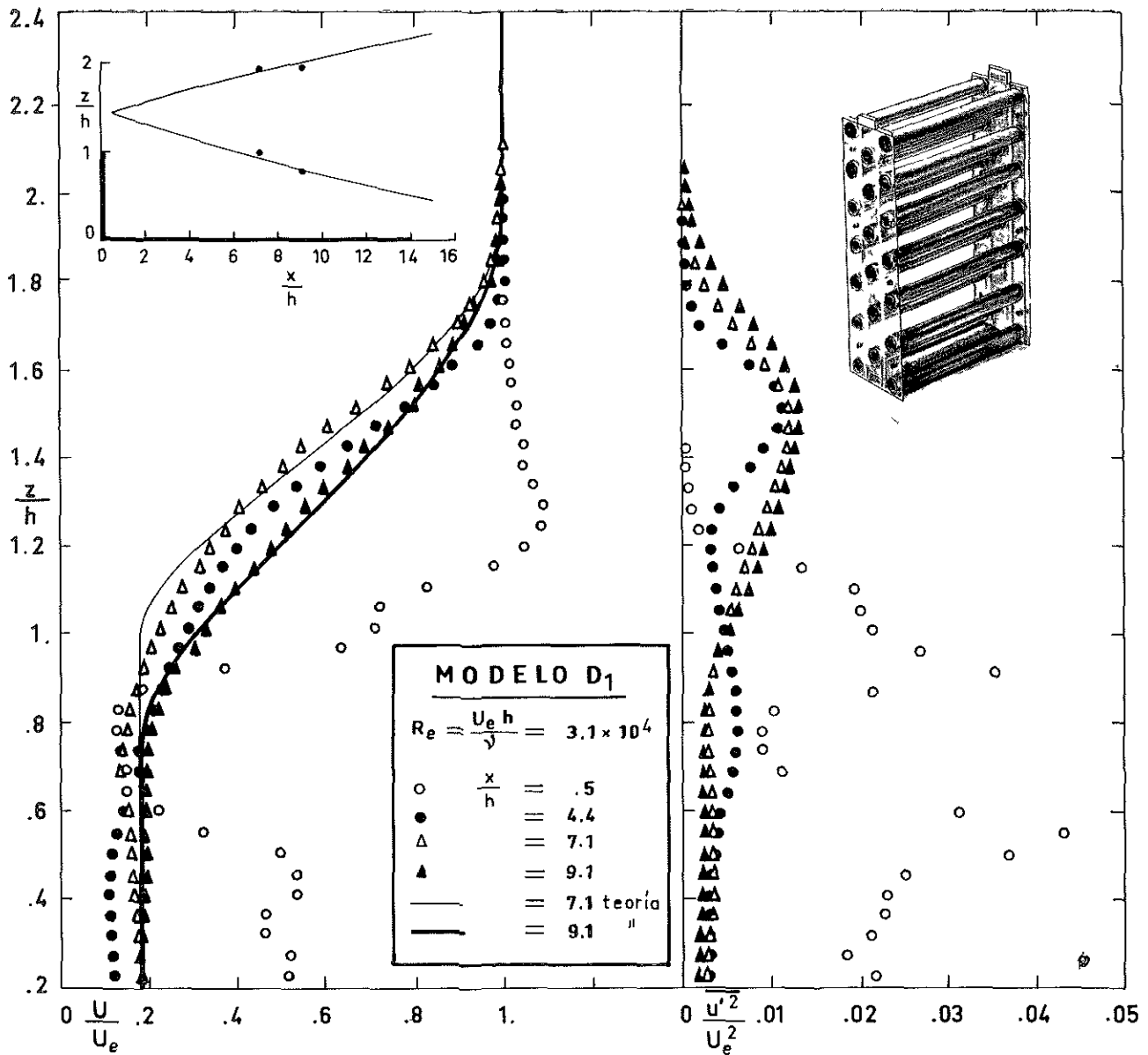


Fig. 4-8. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera formada por cilindros de eje horizontal.

4-F. Modelos F_1 y F_2 .

Estos modelos fueron ensayados a petición de J. Martín Albo, a quien se debe la idea básica.

Están constituidos por elementos trapeciales, colocados de manera que cada orificio sea una tobera convergente con el eje inclinado hacia arriba (figuras 4-13 y 4-14). Las porosidades, medidas en fun-

ción de las dimensiones de la parte posterior de la barrera, valen $\sigma = 0.24$ para la F_1 y 0.19 para la F_2 . El objeto de la tobera convergente es aumentar la cantidad de movimiento inyectada en la estela, mientras que con la inclinación del eje de las toberas se pretende ensanchar la estela. Las figuras 4-13, b y 4-14, b muestran que la deflexión de la corriente es muy grande al principio, pero que el efecto se amortigua rápidamente.

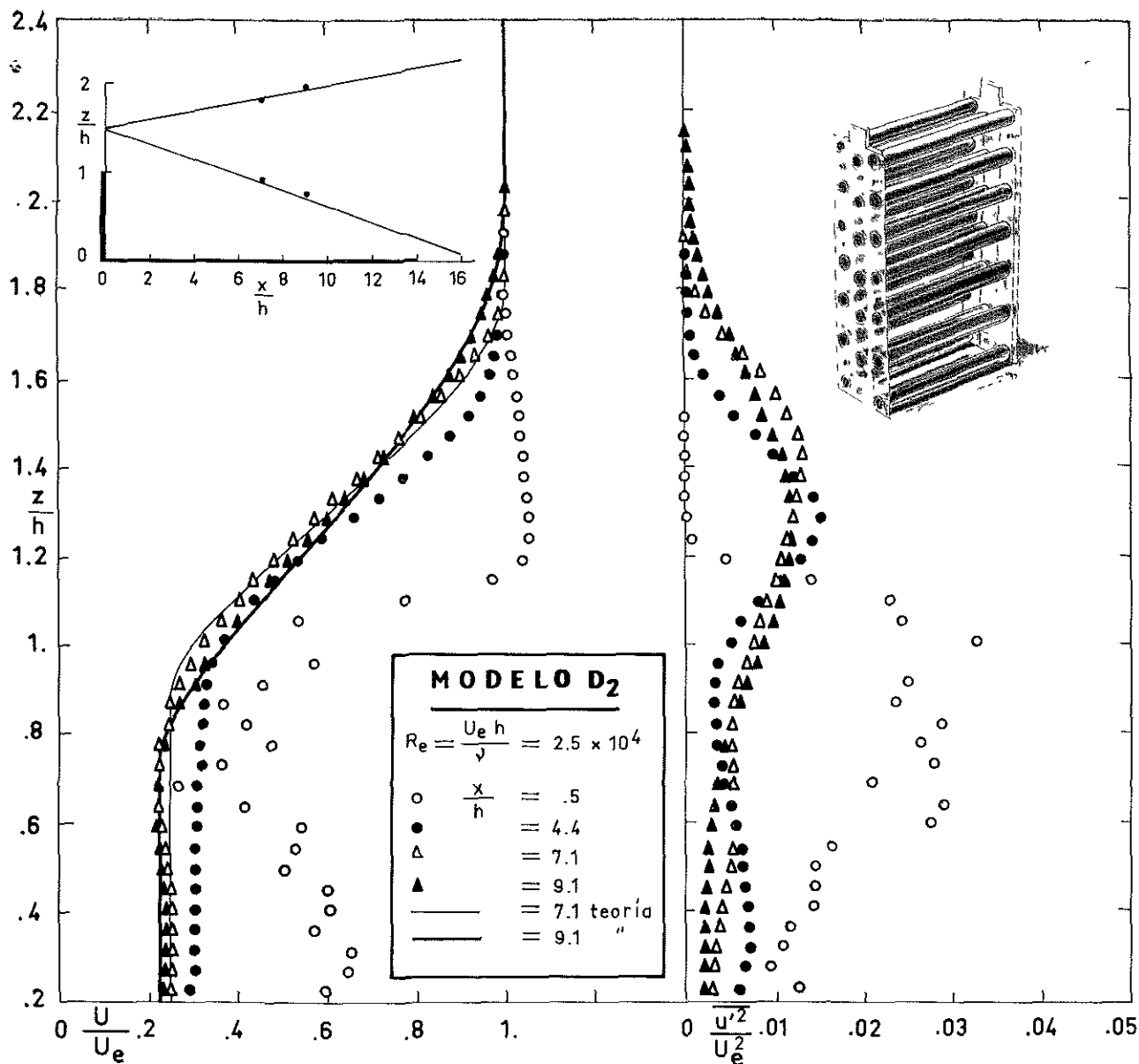


Fig. 4-9.—Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera formada por cilindros de eje horizontal.

La turbulencia introducida es grande, y la zona protegida se caracteriza por una velocidad mínima pequeña y una longitud mayor en el caso F_1 que en el F_2 , que tiene una porosidad excesivamente pequeña.

Los coeficientes de resistencia valen 0.54 en el primer caso y 0.46 en el segundo, lo que, en prin-

cipio, parece sorprendente. Sin embargo, es curioso comprobar que el nivel de turbulencia y el espesor de disipación de energía (tablas 2, a y b) son también mayores en el primero que en el segundo caso, debido a que la barrera menos sólida defleca más eficazmente la corriente incidente.

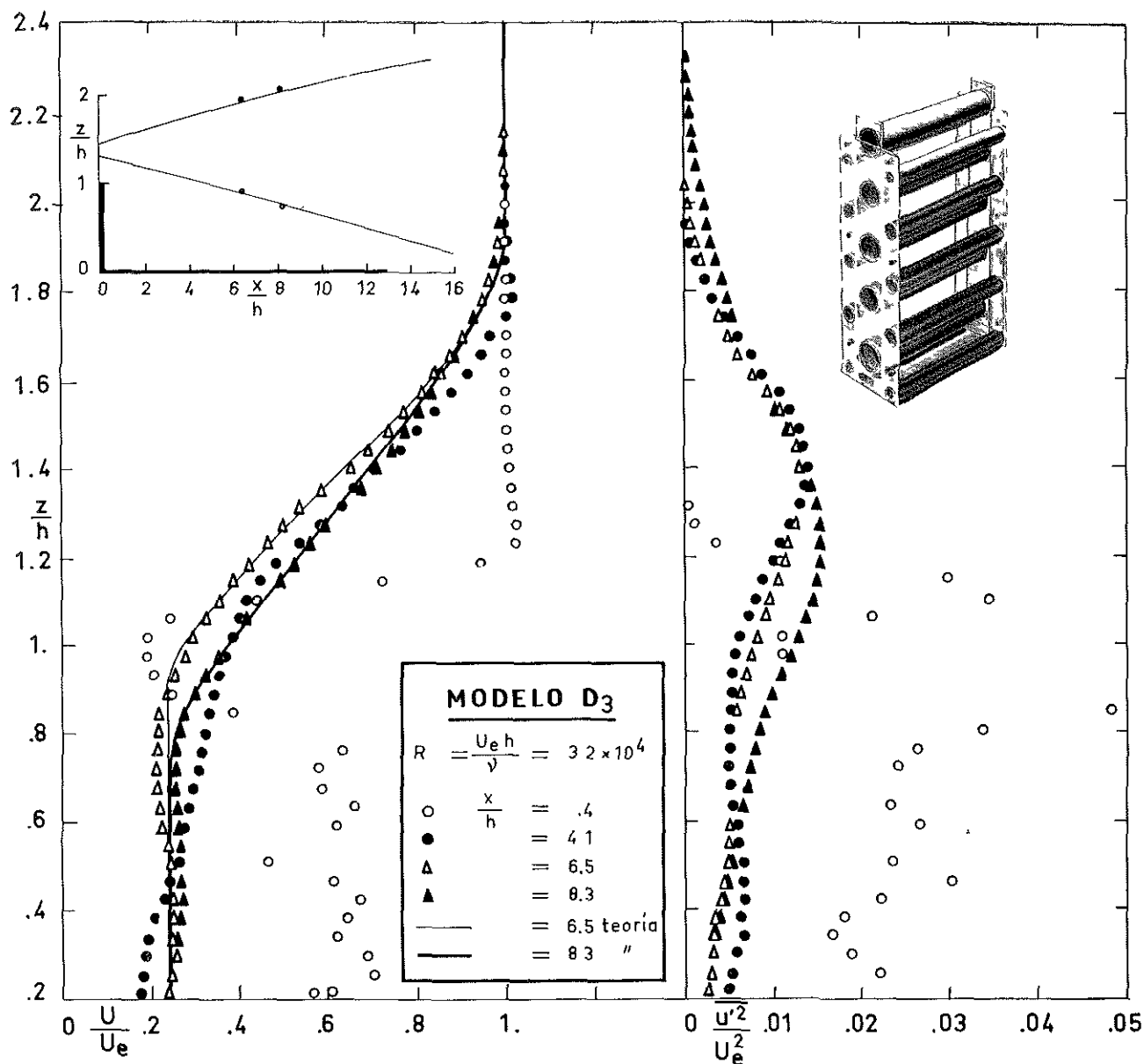


Fig. 4-10.—Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera formada por cilindros de eje horizontal.

4-G. Modelos G₁ y G₂.

Son unos muros de porosidad muy pequeña provistos de aberturas en la parte inferior, a través de las que se inyectan chorros concurrentes en la estela, y una abertura superior que tiene por objeto formar una cortina de aire vertical, que aumenta la altura eficaz del muro (figs. 4-15 y 4-16). El resultado es una zona protegida en la que la veloci-

dad es extraordinariamente baja y el nivel de turbulencia local altísimo.

La interpretación de los primeros ensayos con el modelo G₁ puso de manifiesto la existencia de dos puntos confusos: A) Posible influencia del techo de la cámara de ensayos en el campo de velocidades. B) Existencia de una zona de recirculación que el anemómetro, que no discrimina la dirección de la corriente incidente, no es capaz de detectar.

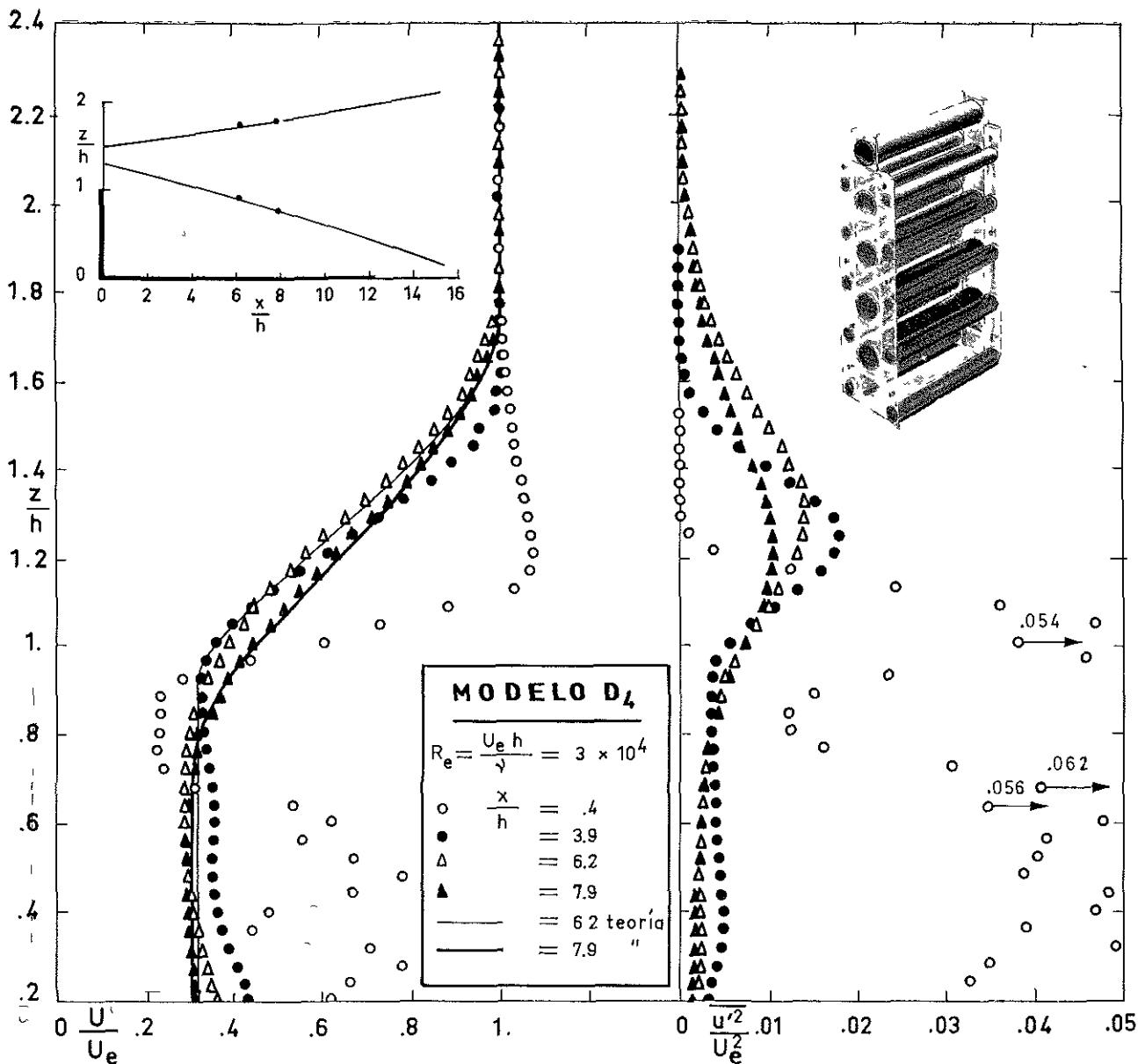


Fig. 4-11. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera formada por cilindros de eje horizontal

Para intentar aclarar el primer punto se construyó el modelo G_2 , que parece mucho más eficaz, como se observa comparando los contornos de las zonas de mezcla de las figuras 4-15 y 4-16, a. En principio, la mayor eficacia relativa de la barrera G_2 se atribuyó a que estaba libre de la interferencia del techo, pero estimaciones posteriores de tal interferencia, basadas en el método de Maskell [8] y que se presentarán en el capítulo 8, indican que

en ninguno de los dos casos es apreciable. La razón de la mayor eficacia del modelo G_2 reside en que el impulso del chorro que forma la cortina de aire es mayor que en la G_1 , porque la abertura de entrada está colocada en una zona donde la presión es mayor.

Para poner de manifiesto la posible existencia de zonas de recirculación, se construyeron modelos de mayor tamaño, que fueron ensayados en un túnel aerodinámico de $800 \times 1000 \text{ mm}^2$ de sección.

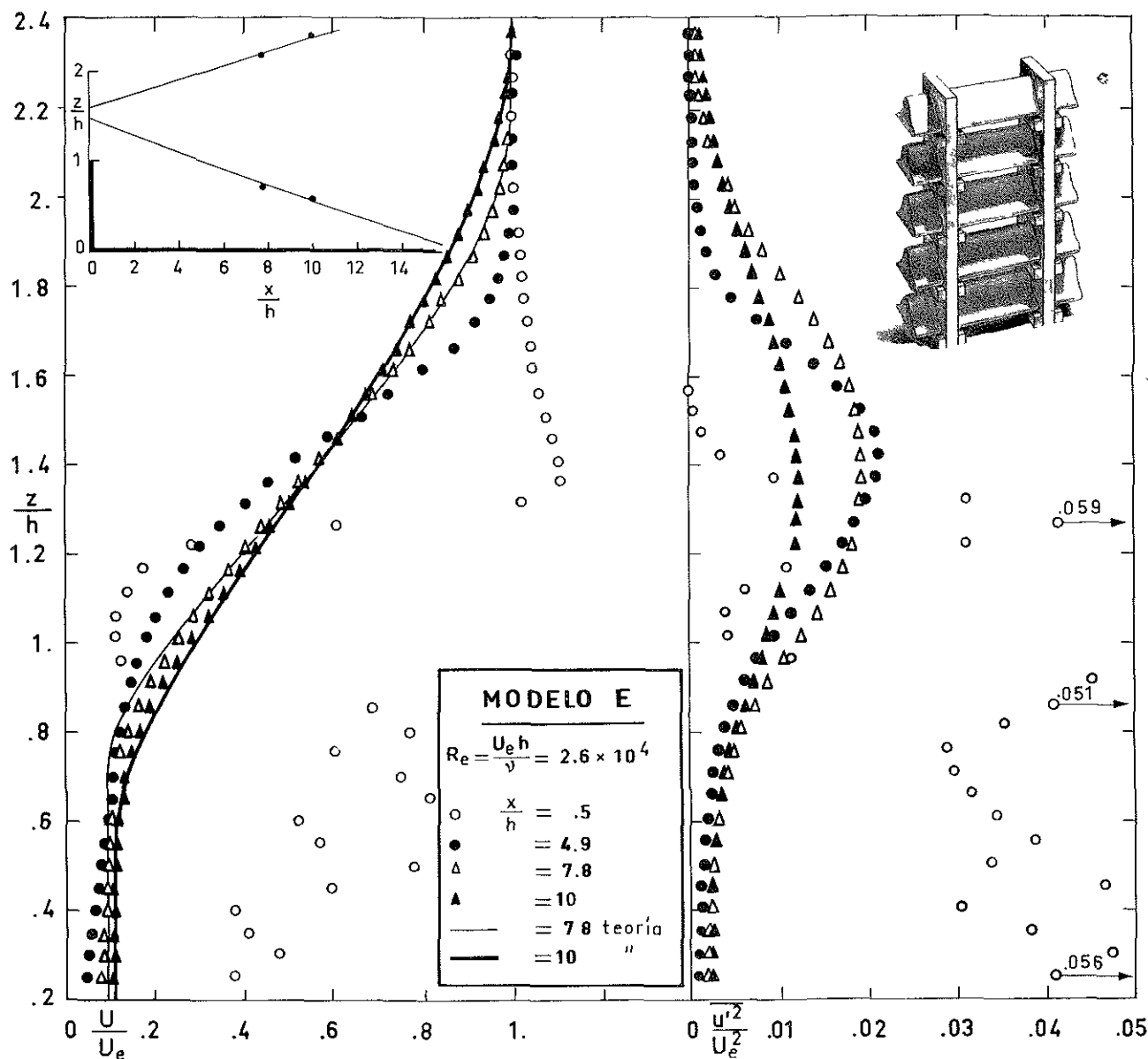


Fig. 4-12. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de una barrera "González del Carmen".

Se visualizó la corriente pintando una pared blanca de plexiglás con una pintura formada por negro de humo suspendido en fuel-oil, y se exploró el campo de presiones mediante sondas de estática embutidas en el suelo.

Los resultados se muestran en las figuras 4-17 y 4-18. Las zonas de velocidad, U , negativa, son puramente locales, y la presión en el suelo es relativamente uniforme.

Este tipo de muro, llamado Columbia, es el más interesante de todos los estudiados desde el punto

de vista técnico, pero su coste elevado y la turbulencia que introduce no parece que sean muy favorables para usos agrícolas.

5. POSIBLE EXISTENCIA DE UNA POROSIDAD ÓPTIMA.

Los ensayos presentados muestran que, en lo referente a la protección contra los efectos mecánicos del viento, es difícil decidir cuál es la porosidad

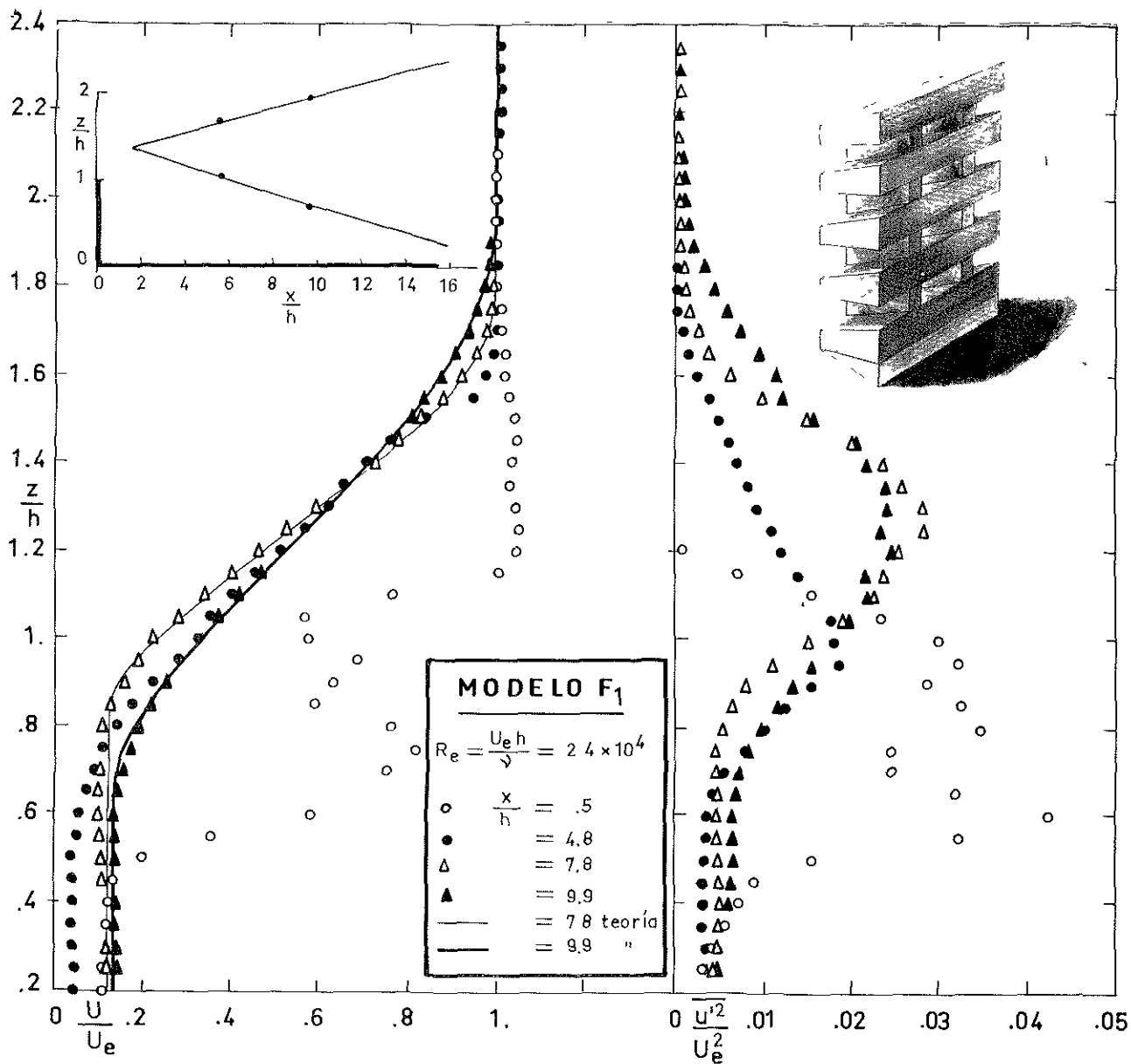


Fig. 4-13a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un muro formado por elementos trapeciales.

óptima de las barreras. Si la porosidad es pequeña, también lo es la velocidad mínima en la zona protegida, pero, dado que el proceso de mezcla es más eficaz, es menor la longitud de dicha zona. Por el contrario, si aumenta la porosidad, aumentan la velocidad mínima y la longitud de la zona protegida.

Al instalar una barrera protectora se pretende tener una velocidad igual a una cierta fracción de la

exterior, a una distancia dada corriente abajo de la barrera y a una altura sobre el suelo fijada.

Para ilustrar la dificultad que presenta la elección de la porosidad más apropiada puede ser conveniente utilizar un modelo simplificado que, de acuerdo con los resultados de los experimentos anteriores, parece apropiado, salvo en las proximidades de la barrera.

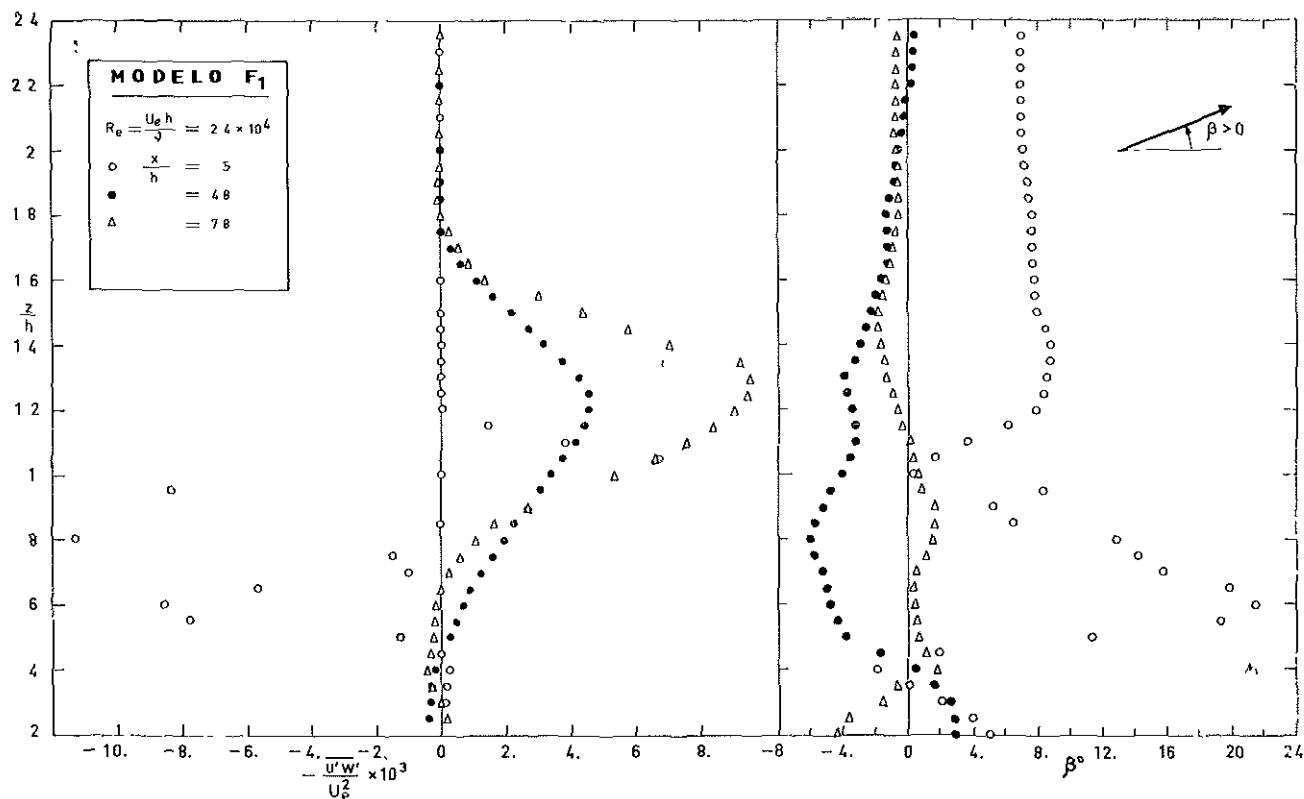


Fig. 4-13b.—Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela del muro formado por elementos trapeciales de la figura anterior.

Las características principales de dicho modelo son:

- 1.º La presión estática es uniforme.
- 2.º En la zona próxima, pero no excesivamente, a la barrera, la configuración se asemeja a la de una capa de cortadura que separa dos corrientes paralelas. En la corriente interior, próxima al suelo, la velocidad vale $m_0 U_e$, en la corriente exterior vale U_e .

Las fronteras de la zona de cortadura son, con nuestra notación [4].

La exterior:

$$\frac{z_e}{z_0} = 1 + \xi \left(\frac{1 - m_0}{1 + m_0} - \frac{1}{\xi_f} \right). \quad (8a)$$

La interior:

$$\frac{z_i}{z_0} = 1 - \frac{\xi}{\xi_f}. \quad (8b)$$

En estas expresiones es $\xi = cx/z_0$, y ξ_f es la abscisa adimensional de la sección final de esta zona.

$$\xi_f = \frac{1}{A_1} \frac{m_0(1 + m_0)}{(1 - m_0) \left(1 - \frac{A_2}{A_1} (1 - m_0) \right)}, \quad (8c)$$

expresión que evidentemente no es válida para valores muy pequeños de m_0 , para los que no parece lógico pensar que la presión estática permanezca constante.

3.º A gran distancia de la barrera, el campo de velocidades se asemeja al de un semichorro completamente desarrollado, que tiene las siguientes características:

a) La ley de ensanchamiento es:

$$\frac{db/z_0}{d\xi} = \frac{1 - m(\xi)}{1 + m(\xi)}, \quad (9a)$$

donde $m(\xi) = U(\xi; 0)/U_e$.

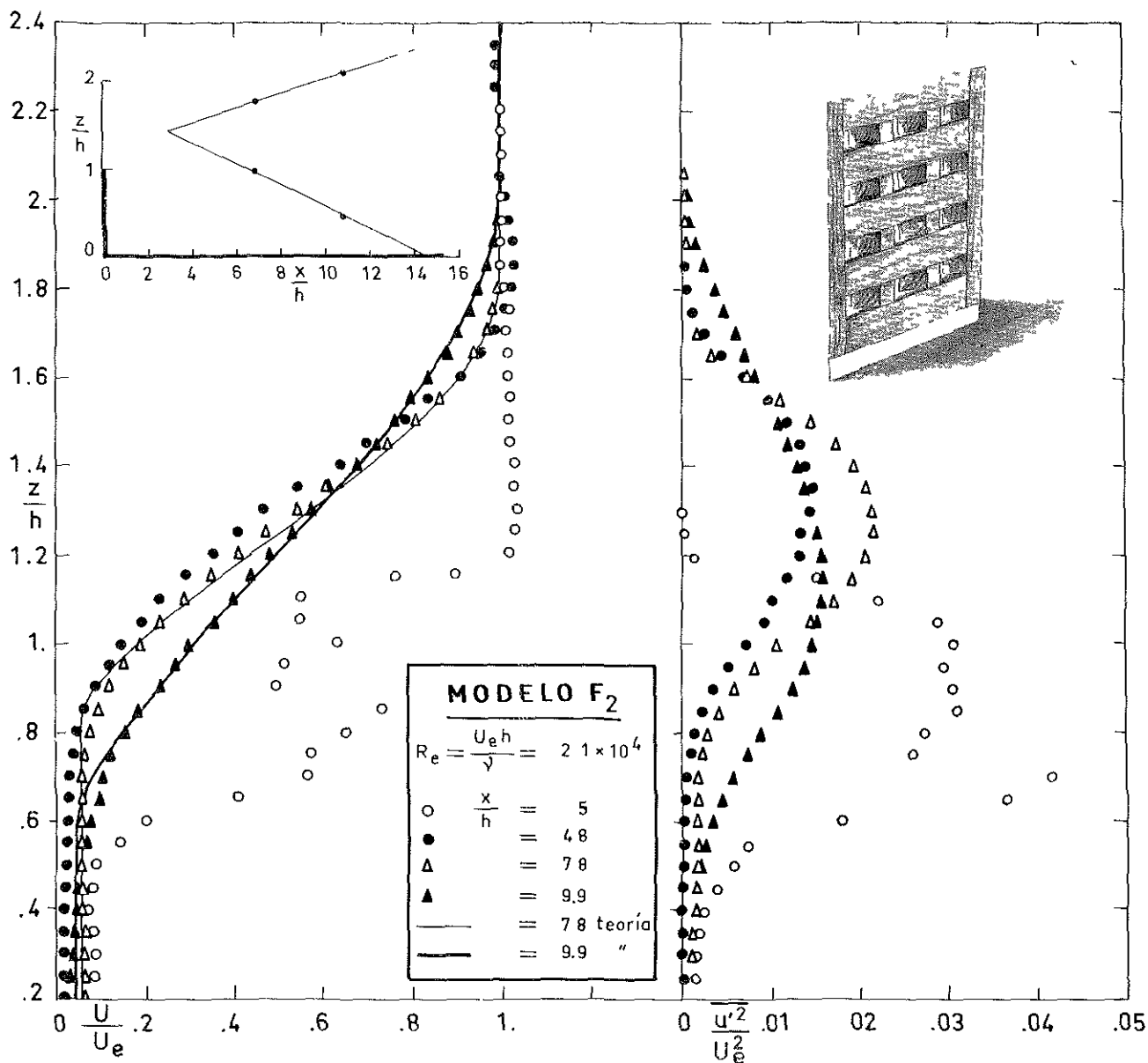


Fig 4-14a — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un muro formado por elementos trapeciales.

b) El perfil de velocidades está dado por la expresión:

$$\frac{U_e - U(\xi; z/z_0)}{U_e - U(\xi; 0)} = (1 - \eta^{1.5})^2, \quad (9b)$$

siendo $\eta = z/b(\xi)$.

c) La velocidad a lo largo del eje del semichorro se calcula teniendo en cuenta que el flujo de déficit de cantidad de movimiento a través de las sucesivas secciones de la estela es constante.

$$b(\xi) \int_0^1 \frac{U}{U_e} \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) d\eta = L. \quad (9c)$$

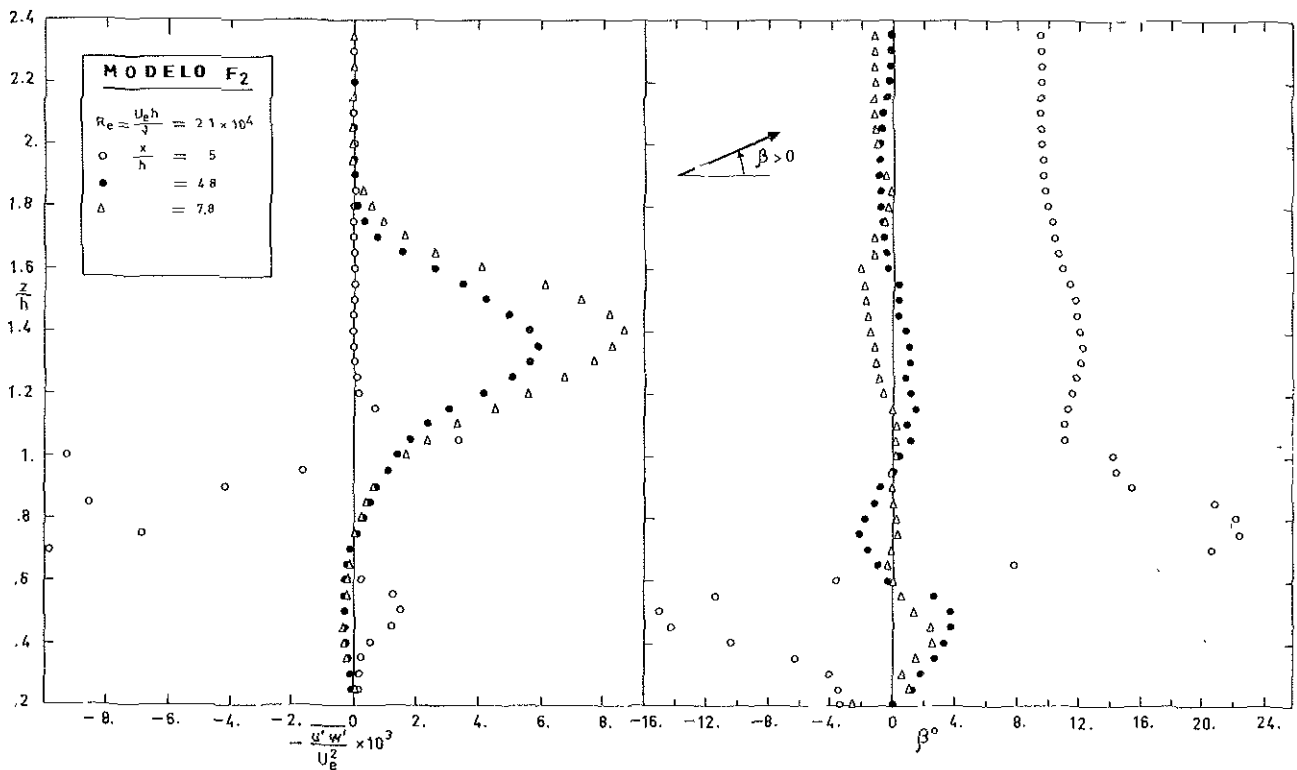


Fig. 4-14b. — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela del muro formado por elementos trapeciales de la figura anterior.

Las tres ecuaciones (9, a), (9, b) y (9, c) definen el contorno y campo de velocidades de la estela alejada, salvo una traslación ξ_c . En particular, la velocidad adimensional en el eje, $m(x)$, está dada por:

$$1 - m = \frac{A_1}{2A_2} \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{A_2}{A_1 B}} \right] \quad (9 d)$$

y el contorno, $b(\xi) = L B(\xi) / A_1$, está definido por la ecuación:

$$B^2 \left[1 - \frac{A_2}{A_1} (1 - m) \right] - B \left[1 + \frac{A_2}{A_1} - 2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 (1 - m) \right] + 2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \log_e [B(1 - m) - 1] = \frac{A_1 z_0}{L} (\xi - \xi_c). \quad (9 e)$$

Es fácil comprobar que, para valores grandes de $B(\xi)$ la estela se comporta en la forma indicada en el capítulo 2, apartado 3.

4.º Entre las zonas próxima y alejada existe una zona de transición caracterizada por las siguientes propiedades:

a) El contorno exterior es la prolongación del correspondiente a la zona inicial.

b) Las líneas de velocidad constante son las mismas semirrectas con origen en el punto $(0; z_0)$ correspondientes al campo próximo, en tanto no cor-

ten a $z = 0$ ó entren en la zona de chorro completamente desarrollado. De acuerdo con esto, la velocidad en el eje $z = 0$ valdrá:

$$m(\xi) = 1 - (1 - m_0) \left[1 - \left(\frac{\xi/\xi_f - 1}{(1 - m_0)/(1 + m_0)} \right)^{1.5} \right]^2. \quad (10)$$

Esta zona de transición empalma, con valores continuos de $b(\xi)$ y $m(\xi)$, con la zona alejada. Su espesor es, en los casos considerados, muy pequeño.

Para valores de $m_0 \leq 0.288$ no es posible empalmar de forma continua las dos zonas, lo que pa-

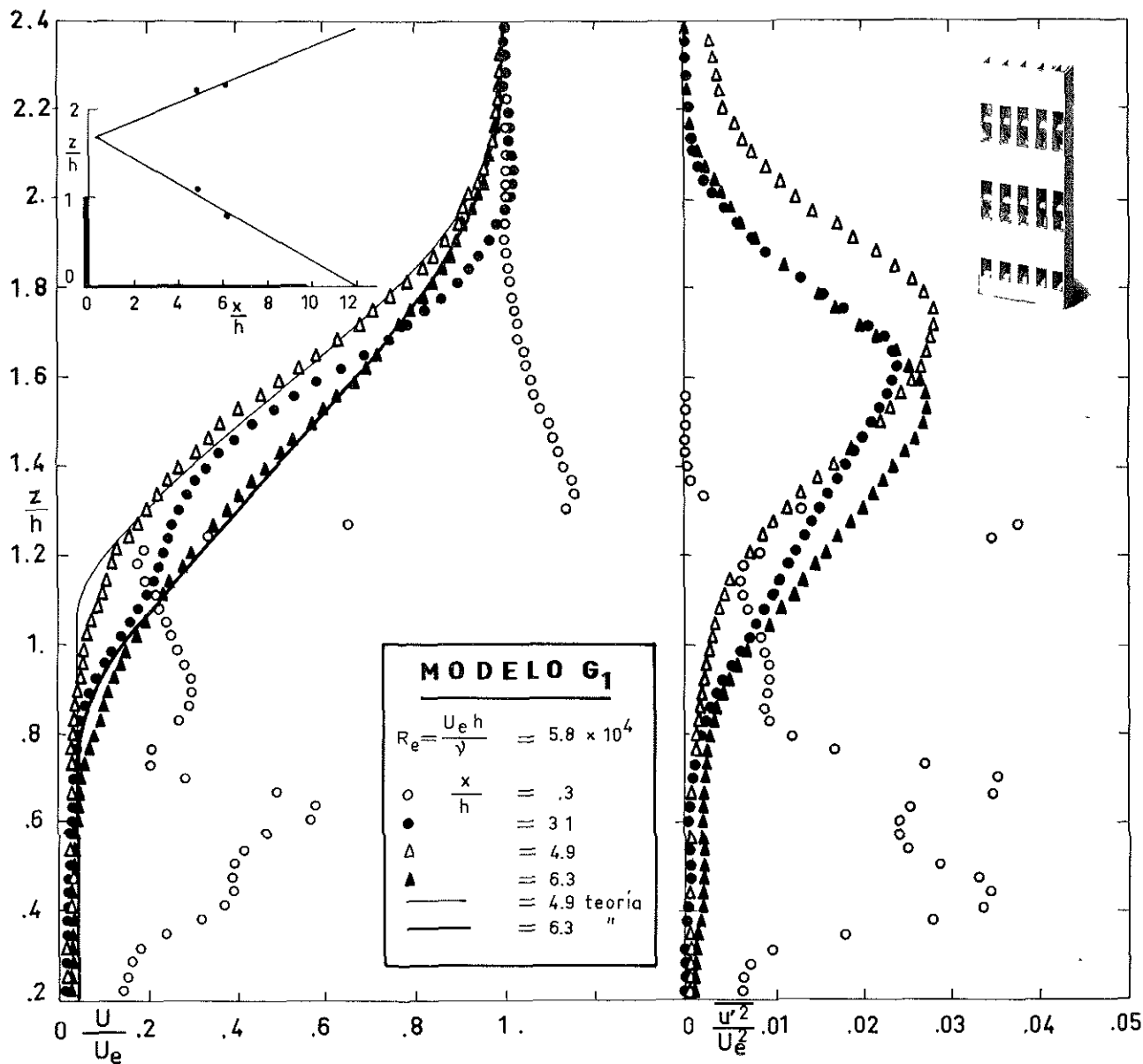


Fig. 4-15. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un muro "Columbia".

rece indicar, una vez más, que la hipótesis de presión constante no es válida cuando m_0 es pequeño. La figura 4-19, *a*, representa $m(\xi)$ para distintos valores de m_0 . Se comprueba que, para conseguir una protección relativamente eficaz a gran distancia, es conveniente aumentar m_0 y, para esto, la porosidad de las barreras.

En la práctica carece de sentido hablar de la velocidad en el suelo, que es nula por efecto de la capa límite viscosa no considerada en este estudio. Por esta razón la figura 4-19, *b*, contiene las curvas de $U(\xi; z/z_0)/U_e$ calculadas para $z/z_0 = 0.323$ que, de acuerdo con los valores de z_0/h obtenidos de los

experimentos, corresponde a una distancia al suelo, aproximadamente, igual a la mitad de la altura de la barrera. Se observa la misma tendencia que en $z = 0$, pero lógicamente la velocidad en cada sección es mayor.

De estas consideraciones se deduce que la porosidad óptima depende de múltiples factores y que, aun limitándonos a considerar exclusivamente el problema de la protección de los efectos mecánicos del viento, no es fácil elegir el valor más apropiado, que depende de las velocidades admisibles en las proximidades de la barrera y de la longitud de la zona que se intenta proteger.

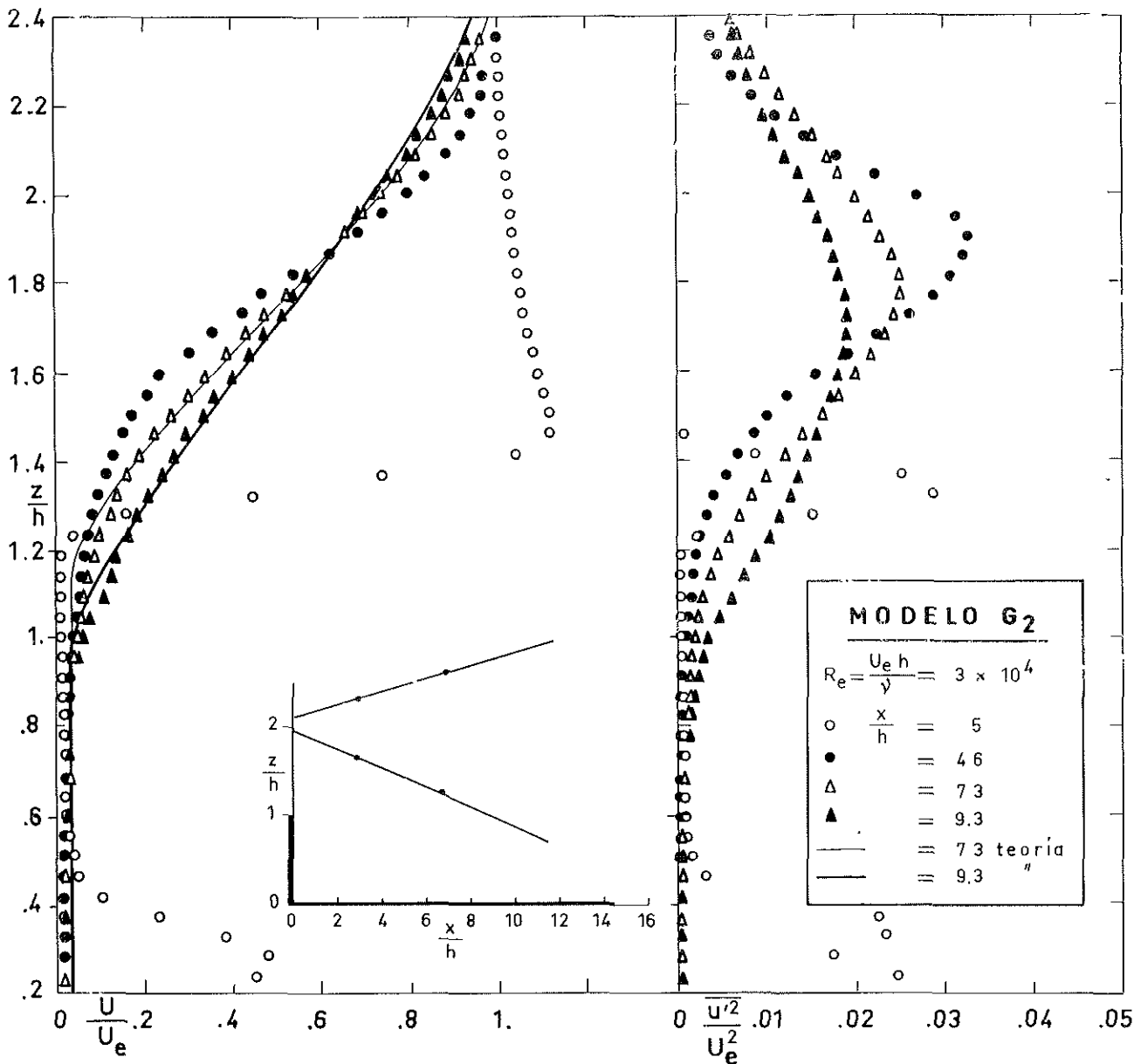
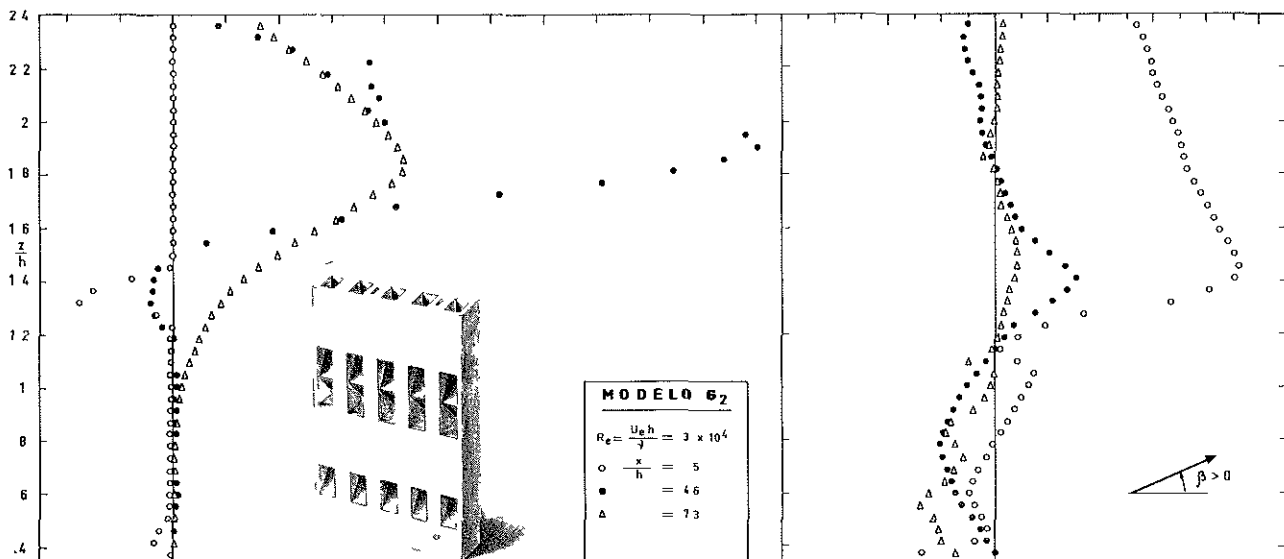


Fig. 4-16a. — Velocidad, nivel de turbulencia y contorno de la zona de mezcla detrás de un muro "Columbia".

Fig. 4-16b. — Esfuerzos de Reynolds e inclinación del vector velocidad media en la estela del muro "Columbia" de la figura anterior.



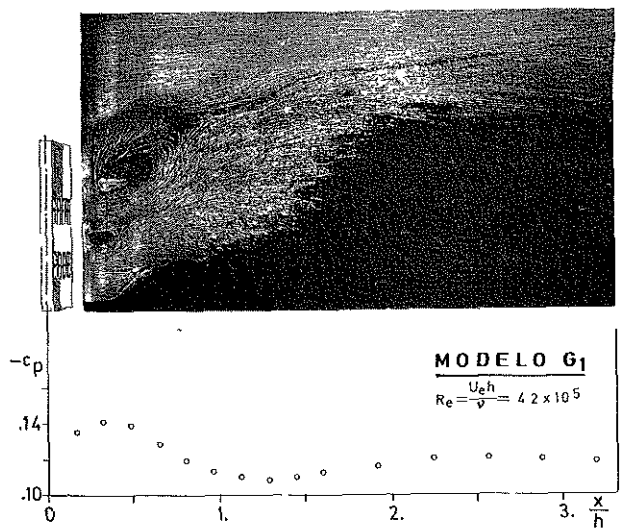


Fig. 4-17. — Visualización de la estela y campo de presiones en el suelo, con el modelo G_1 .

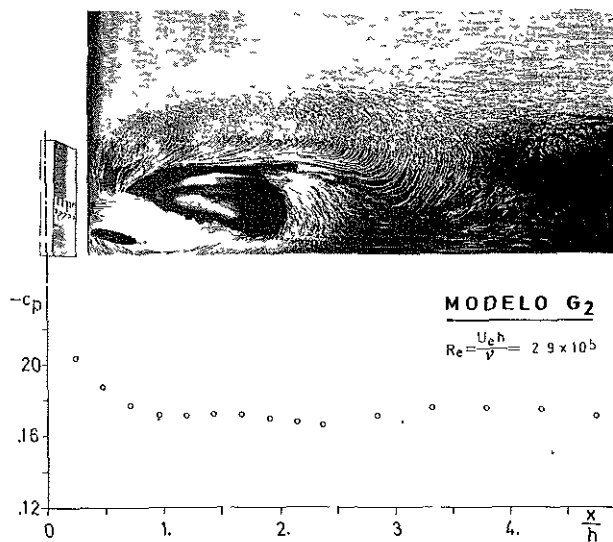


Fig. 4-18. — Visualización de la estela y campo de presiones en el suelo, con el modelo G_2 .

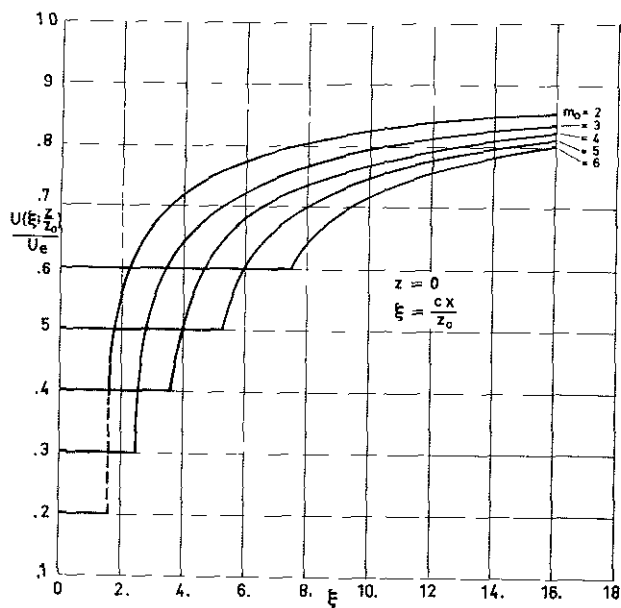


Fig. 4-19a. — Distribución teórica de velocidades en el eje de un chorro que descarga paralelamente a una corriente exterior, para diferentes valores de la relación de la velocidad de descarga a la exterior.

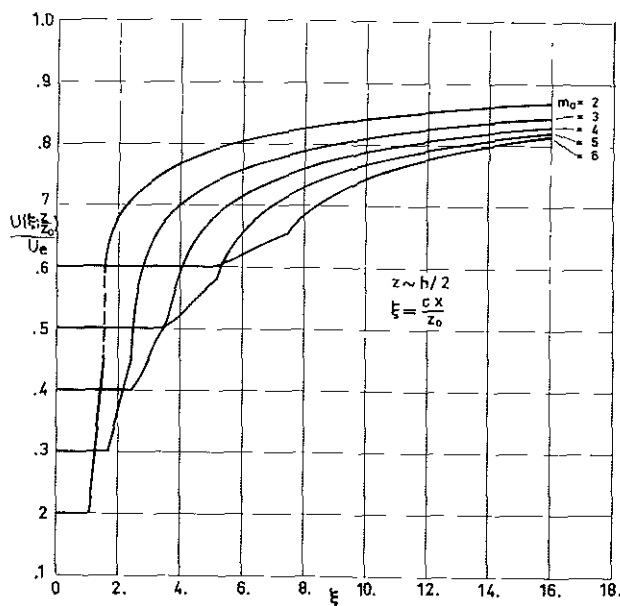


Fig. 4-19b. — Distribución teórica de velocidades a lo largo de una línea paralela al eje del chorro de la figura anterior.

BIBLIOGRAFIA

1. CASTRO, I. P.: "Wake Characteristics of Two-Dimensional Perforated Plates Normal to an Air Stream". J. Fluid Mech. Vol. 46, part 3, 13 Ap. 1971, pp. 599-609.
2. CABORN, J. M.: "Shelterbelts and Windbreaks". Faber & Faber Ltd., London, 1965, Chap 1, pp. 17-37.
3. SCHLICHTING, H.: "Boundary Layer Theory". McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1960, Chap XXIII, pp. 590-614.
4. ABRAMOVICH, G. N.: "The Theory of Turbulent Jets". The M.I.T. Press Cambridge. Mass. 1963, Chap 4, pp. 148-171.
5. SABIN, C. M.: "An Analytical and Experimental Study of the Plane, Incompressible, Turbulent Free-Shear Layer with Arbitrary Velocity Ratio and Pressure Gradient". Journal of Basic Engineering. Vol. 87, series D, No. 2, pp. 421-428, June 1965
6. SAVAGE, R. P., y WOODHOUSE JR., W. W.: "Creation and Stabilization of Coastal Barrier Dunes". *Proceedings of Eleventh Conference on Coastal Engineering*. Vol. 1, London, Sept. 1968, Chap 43, pp. 671-700.
7. ROSENBERG, N. J.: "The Influence and Implications of Windbreaks in Agriculture in Dry Regions en "Ground Level Climatology". R. H. Shaw Ed. AAAS, pub. No. 86, Washington, D. C., 1967, pp. 327-349.
8. MASKELL, E. C.: "A Theory of Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel". ARC R & M 3400, 1965.